

V SEMINÁRIO NACIONAL DE
PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA

GRUPO VII

ESTUDOS DE PLANEJAMENTO E
OPERAÇÃO ECONÔMICA DE
SISTEMAS ELÉTRICOS

(G P O)

MODELO ESTOCÁSTICO
DE DEMANDA

Autores : Engº Leslie Afranio Terry
Engº Jerson Kelman
Engº Luiz Maurício Thomé
Engº Paulo Abreu Leitão de Almeida

Empresa : CEPEL - Centro de Pesquisas de Energia Elétrica

Recife - PE - Brasil

1 9 7 9.

1- INTRODUÇÃO

O objetivo deste trabalho é relatar resultados parciais do projeto de previsão de carga a curto prazo, em andamento no CEPEL. Embora o modelo tenha sido desenvolvido com base nos dados de carga do sistema Rio, região de concessão da LIGHT Serviços de Eletricidade, acredita-se que possa ser empregado em outras regiões sem maiores problemas. O intervalo de previsão considerado pode variar de uma hora a vários dias. As cargas aqui tratadas, representam a potencialidade de consumo de uma determinada região, a cada momento. Em outras palavras, procura-se estabelecer um modelo do comportamento dos consumidores. Um modelo deste tipo, em conjunto com o conhecimento de condições de serviço da concessionária - alocação da geração, intercâmbios, desligamentos, remanejamentos de cargas, etc. - pode contribuir para uma programação mais eficiente da operação. Previsões de carga a curto prazo são úteis na alocação de máquinas e fixação da reserva girante. Servem também para a identificação a priori de condições operativas vulneráveis. Embora o assunto afete mais sistemas com predominância de geração térmica, vem ganhando crescente atenção no Brasil. Em particular, o tema é analisado nas especificações do Centro de Supervisão e Coordenação da operação do sistema interligado do Brasil [1]. Uma introdução ao assunto é encontrada em [2]. Recentes revisões da literatura referentes a previsões de carga podem ser encontradas em [3], [4]. Em [5] é feita uma catalogação extensiva de artigos sobre previsão de carga.

A carga de um sistema, se observada ao longo do tempo, apresenta um comportamento bem regular, mesmo quando diferentes tipos - industriais, residenciais, comerciais, etc - não são separados. Isto se justifica pelo grande número de consumidores existentes no sistema. Sua mais importante característica reside no comportamento quase periódico. Este comportamento, em 24 horas, é bastante regular e varia muito pouco durante os dias úteis da semana. A diferença é mais acentuada durante os fins de semana e feriados. Observa-se que, dias separados por múltiplos de uma semana mostram um comportamento de carga.

semelhante. Em adição, a carga varia durante as estações do ano. Superposto a estes padrões diários e sazonais, existe o contínuo crescimento anual da demanda de energia elétrica. Nota-se também que a carga é sujeita ainda a flutuações em função das condições climáticas, além de exibir uma certa persistência. Isto é, uma carga acima ou abaixo da média para uma certa hora, tende a ser seguida por cargas, respectivamente, também acima ou abaixo da média nas horas seguintes.

Com a visão qualitativa acima descrita, e após uma série de análises, adotou-se como hipótese de trabalho a concepção de que a carga é uma variável aleatória, cuja distribuição de probabilidade depende basicamente de:

- hora do dia
- época do ano
- ano
- padrão de carga, se dia útil, sábado, feriado, etc.
- temperatura prevista
- última carga medida

Até o momento, no desenvolvimento do projeto, a ênfase tem sido dada na identificação da estrutura do modelo, de suas variáveis importantes e respectivas interrelações. Não houve a preocupação de se chegar a uma formulação muito concisa do modelo ou do método de estimação. De fato, é possível que no passado uma preocupação excessiva neste sentido, tenha contribuído algumas vezes para obscurecer peculiaridades importantes para uma modelagem mais perfeita da demanda de energia elétrica. Neste trabalho procurou-se sempre evitar, em vista dos efeitos desastrosos que isto pode introduzir, englobar observações de variáveis aleatórias distintas, como se fossem oriundas de uma mesma população. Ao contrário, houve em geral mais tolerância com erros no sentido oposto, ou seja, de se considerar eventualmente amostras de uma mesma variável aleatória como oriundas de populações diferentes. Este tipo de erros é de menor importância, pois tende a ser numericamente insignificante quando se dispõe de um grande número de observações. Neste sentido, aceitar-se-ia, por exemplo, cometer

um eventual engano ao se considerar as cargas de domingo e de segunda-feira, às 3 horas, como pertencentes a populações diferentes, enquanto que não se aceitaria considerar as cargas destes mesmos dias, às 15 horas, como pertencentes a uma mesma população.

Optou-se por executar a estimação dos parâmetros do modo "off-line", o que deverá ser feito de tempos em tempos, por exemplo, mensalmente. A possibilidade de se utilizar um processo de estimação adaptativo foi descartada por se julgar que para previsões a curto prazo, onde a massa disponível de informações é muito grande, as eventuais modificações dos parâmetros feitas hora a hora seriam insignificantes. Uma alternativa seria atribuir um valor relativo maior às observações mais recentes da carga, quando por outro lado se correria o risco de que o modelo viesse a interpretar simples flutuações aleatórias da carga como mudanças nos hábitos da comunidade. Convém frizar, no entanto, que para previsões a médio e longo prazo - carga mensal, por exemplo - o método adaptativo de estimação parece ser bastante eficiente [6].

O esforço computacional "on-line" exigido pelo modelo aqui apresentado reduz-se à simples utilização, a cada hora, das equações apropriadas para a determinação das previsões de carga e respectivos intervalos de confiança, com base na observação mais recente de carga e de temperatura.

A segunda seção deste texto é dedicada à apresentação do modelo. A terceira mostra um exemplo de utilização. Finalmente a quarta seção conclui o trabalho, relacionando novos tópicos que serão desenvolvidos com a continuação do projeto. A redação foi feita com a preocupação de não prejudicar a clareza, em benefício da precisão de notação. Por exemplo, o par (h, d) , onde h é o índice de hora e d de dia, pode eventualmente assumir o valor $(27, d)$, quando a representação correta seria $(3, d+1)$. Adotou-se a convenção de que letras maiúsculas representam variáveis aleatórias ou matrizes, e letras minúsculas observações destas variáveis ou constantes. O sím

bolo $f(X_1|x_2)$ significa a densidade de probabilidade de X_1 conhecido que $X_2 = x_2$. $E[X]$, $S[X]$, $S^2[X]$ significam respectivamente o valor esperado, o desvio padrão e a variância de X . $R[X_1, X_2]$ é a correlação entre X_1 e X_2 . A' é a matriz transposta de A .

2- MODELO PROPOSTO

2.1 Apresentação do Modelo

Como já mencionado, a demanda de energia elétrica num da do instante é vista aqui, como dependente da hora h , do dia d , do padrão de carga p correspondente a este dia - domingo, dia útil, feriado, etc - e do ano a . Ela é vista também como um produto de dois fatores. O primeiro representa o crescimento vegetativo. O segundo aglutina as características invariantes, ano a ano, do comportamento da demanda. A equação do modelo é:

$$\frac{C(h, d, p, a)}{v(d, a)} = y(h, d, p) + F(T(h, d)) + W(h, d, p) \quad (1)$$

onde:

- $C(h, d, p, a)$ - representa a demanda de energia elétrica.
- $v(d, a)$ - é o fator de crescimento vegetativo ou tendência. É consequência do ingresso de novos consumidores ou da elevação do nível de consumo.
- $y(h, d, p)$ - é o valor esperado da carga sem tendência. Esta é uma componente determinística, função apenas de h , d , p . Trata-se de uma generalização da curva de carga do padrão p , de modo a levar em conta a sua variação sazonal que é expressa pela introdução de d como variável livre.
- $F(T(h, d))$ - é uma componente aleatória dependente da temperatura também aleatória $T(h, d)$ e que tem origem na mudança de consumo de aparelhos de ar condicionado, refrigeradores, em razão da temperatura. Mais preci

samente ela traduz a flutuação da carga em função da diferença entre a temperatura observada $T(h,d)$ e seu valor esperado $E[T(h,d)]$ para aquela hora h e dia d .

$W(h, d, p)$ - é uma componente residual representando os desvios da carga sem tendência em relação às duas componentes anteriores. Supõe-se, neste trabalho, que $W(h,d,p)$ tenha valor esperado nulo, e é independente da temperatura. Como será abordado adiante, esta componente apresenta uma dependência temporal.

Os itens que se seguem descrevem com mais detalhes cada uma destas componentes apresentadas.

2.2 Crescimento Vegetativo

$C(h,d,p,a)$ é uma variável aleatória cuja distribuição de probabilidade é distinta da distribuição de $C(h,d,p,a')$ para $a \neq a'$, devido basicamente ao crescimento do mercado de energia elétrica entre os anos a e a' .

Admitindo-se, por simplicidade, um crescimento proporcional dos segmentos que compõem o mercado e, portanto, que a carga ao longo das horas e para os diversos padrões também cresce de modo proporcional, é razoável aceitar que $C(h,d,p,a)/v(d,a)$ e $C(h,d,p,a')/v(d,a')$ tenham as mesmas propriedades.

A função $v(d,a)$ traduz o referido crescimento. A rigor a tendência - como também é chamado o crescimento vegetativo - constitui um processo estocástico. Sua estimação e previsão constitui objeto de toda uma classe de modelos. Normalmente o aumento da demanda em termos mensais é vista sob a ótica de série temporal. Já em [6] informações apriorísticas sobre a evolução do sistema são combinadas com métodos adaptativos resultando num interessante método de previsão. Uma metodologia mais abrangente é empre

gada nos estudos de planejamento da expansão e da operação dos sistemas elétricos nacionais [7],[8]. A carga é, neste caso, decomposta em suas diversas componentes: residencial, industrial, etc. O crescimento de cada parcela é então estudado isoladamente em função de diversos fatores econômicos.

Por simplicidade, nesta fase do projeto, optou-se por considerar simplesmente $v(d,a)$ como função determinística. Esta é estimada em cada data (d,a) pela média geométrica das cargas diárias medidas meio ano antes e meio ano depois. No entanto, na aplicação real do modelo, é preferível que, sempre que possível, a tendência seja estimada não a partir da própria série temporal de observações, mas diretamente a partir de informações adicionais tais como o aumento de número de consumidores e das respectivas potências instaladas.

2.3 Comportamento Periódico

O estudo do comportamento periódico da demanda $y(h,d,p)$ é realizado sobre o histórico das cargas com o efeito da tendência já removido, isto é, sobre a série $C(h,d,p,a) / v(d,a)$. As ciclicidades diárias, semanais e sazonais existentes nesta série, induzem naturalmente a uma modelagem por análise harmônica de Fourier. Entretanto, a aplicação direta desta técnica à série mencionada esbarraria em diversos inconvenientes, entre os quais a existência de feriados, quebrando o ciclo semanal de hábitos de consumo. Assim, pareceu mais adequado estabelecer padrões de curvas de carga diárias, agrupando ciclos diários homogêneos tais como: dias úteis, sábados, domingos, feriados, dias vizinhos a feriados, etc..

A forma de cada um destes padrões de carga p , pode apresentar variações ao longo do ano, causadas por efeitos sazonais que influenciam os hábitos de consumo, como dias mais curtos ou mais longos, temperaturas diferentes, compras de fim de ano, férias escolares, etc.. Na ilustração 2.3-1 é mostrada a variação da forma da curva de carga p_a

ra um mesmo padrão de carga em épocas diferentes do ano. Esta variação também pode ser observada nas ilustrações 2.3-2 e 2.3-3. Os pontos ali existentes representam cargas sem tendência relativas aos anos de 1976 e 1977, para o padrão de carga segunda-feira respectivamente para as horas 13 e 19. Observe-se que a variação sazonal da carga é bastante diversa para horas diferentes do dia, afastando a possibilidade simplista de modelar a sazonalidade por intermédio de um único fator de escala, variável em função de d , multiplicando uma curva de carga constante. Em resumo, considera-se as cargas correspondentes aos diversos padrões de carga, como oriundas de populações diferentes.

Como as observações das cargas relativas a cada padrão de carga se encontram dispersas ao longo do ciclo anual, torna-se adequado representar a evolução da componente periódica em d , através do ajustamento de séries truncadas de Fourier. Em geral um número pequeno de harmônicos é suficiente para um bom ajustamento, pois estas variações sazonais tendem a ser suaves. O mesmo não se verifica com a evolução da carga ao longo das horas. Neste caso, ocorrem oscilações bruscas de natureza não aleatória, que podem ser facilmente constatadas pelo exame de curvas de carga do mesmo padrão p , observadas em dias próximos. O grande número de harmônicos necessário para reproduzir estas irregularidades desencorajou o uso da decomposição de Fourier neste caso. Desta forma, optou-se por organizar para cada par (h,p) uma tabela de coeficientes de Fourier, com os quais é possível calcular o valor de $y(h,d,p)$ para qualquer d .

Na determinação dos parâmetros do modelo da componente periódica $y(h,d,p)$, devido à não equidistância entre as observações - introduzida pela existência de feriados e condições anormais de operação - as fórmulas usuais de análise harmônica não podem ser empregadas. Ao invés disso, para cada padrão de carga p e para cada hora h , os respectivos coeficientes de Fourier $A_k(h,p)$ e $B_k(h,p)$ para

$k = 0, 1, \dots, n$; são calculados de forma a minimizar a soma dos quadrados dos resíduos do ajustamento:

$$g(h,p) = \sum_{d,a} \left\{ \frac{C(h,d,p,a)}{v(d,a)} - y(h,d,p) \right\}^2 \quad (2)$$

onde:

$$y(h,d,p) = \sum_n A_n(h,p) \cos \lambda_{n,d} + B_n(h,p) \sin \lambda_{n,d} \quad (3)$$

sendo:

$A_n(.)$ e $B_n(.)$ - coeficientes de Fourier do harmônico de ordem n .

$\lambda_{n,d} = \frac{2n\pi(d-1)}{\tau}$ - onde τ é igual a 365 ou 366 conforme o ano a .

Diferenciando-se $g(h,p)$ em relação aos coeficientes de Fourier $A_0(h,p)$, $A_1(h,p)$, ..., $A_n(h,p)$ e $B_1(h,p)$, $B_2(h,p)$, ..., $B_n(h,p)$ e, igualando estas derivadas a zero, obtém-se um sistema de $2n+1$ equações lineares que podem ser expressas sob a seguinte notação matricial:

L_0	M_{00}	M_{01}	M_{02}	$\dots$	M_{0n}	$A_0(h,p)$
L_1	M_{10}	M_{11}	M_{12}	$\dots$	M_{1n}	$A_1(h,p)$ $B_1(h,p)$
L_2	M_{20}	M_{21}	M_{22}	$\dots$	M_{2n}	$A_2(h,p)$ $B_2(h,p)$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\dots$	$\vdots$	$\vdots$
L_n	M_{n0}	M_{n1}	M_{n2}	$\dots$	M_{nn}	$A_n(h,p)$ $B_n(h,p)$

(4)

onde:

$$L_0 = \sum_{d,a} \frac{C(h,d,p,a)}{v(d,a)}$$

$$L_k = \left[\sum_{d,a} \frac{C(h,d,p,a)}{v(d,a)} \cdot \cos \lambda_{k,d}, \sum_{d,a} \frac{C(h,d,p,a)}{v(d,a)} \cdot \sin \lambda_{k,d} \right]'$$

M_{00} = número de observações de carga existente na série correspondente a uma determinada hora h e padrão de carga p .

$$M_{0k} = M'_{k0} = \left[\sum_{d,a} \cos \lambda_{k,d}, \sum_{d,a} \sin \lambda_{k,d} \right]$$

$$M_{k,l} = M'_{l,k} = \begin{bmatrix} \sum_{d,a} \cos \lambda_{k,d} \cdot \cos \lambda_{l,d} & \sum_{d,a} \cos \lambda_{k,d} \cdot \sin \lambda_{l,d} \\ \sum_{d,a} \sin \lambda_{k,d} \cdot \cos \lambda_{l,d} & \sum_{d,a} \sin \lambda_{k,d} \cdot \sin \lambda_{l,d} \end{bmatrix}$$

As ilustrações 2.3-2 e 2.3-3 mostram o ajuste da componente periódica para o padrão de carga de segunda-feira e horas 13 e 19 respectivamente, utilizando-se 3 harmônicos. Nos estudos realizados verificou-se que, para as cargas analisadas, este número de harmônicos foi suficiente para qualquer hora de qualquer padrão de carga. Nas tabelas 2.3-1 e 2.3-2 são mostrados os coeficientes obtidos para os padrões de carga de domingo e de quarta-feira.

2.4 Influência da Temperatura

Para a região Rio a influência da temperatura na carga do sistema pode ser observada na ilustração 2.4-1. Nela são mostradas, como exemplo, curvas de carga diárias observadas, pertencentes a um mesmo padrão de carga e defasadas de uma semana. A diferença entre as duas curvas, que se repete de modo sistemático quando se comparam dias com temperaturas diferentes, se deve basicamente à variação

no consumo de aparelhos de ar condicionado, refrigeradores, etc.

Considerando as condições climáticas da região estudada, onde predominam cargas de refrigeração, a parcela de carga $U(T)$ dependente da temperatura T é, neste trabalho, a aproximada pela função não -linear mostrada abaixo e que é apresentada na ilustração 2.4-2.

$$U(T) = \begin{cases} 0 & \text{se } T < t_1 \\ \frac{u^*}{t_2 - t_1} (T - t_1) & \text{se } t_1 \leq T \leq t_2 \\ u^* & \text{se } T \geq t_2 \end{cases} \quad (5)$$

onde:

t_1 - é a temperatura abaixo da qual esta parcela de carga é bastante pequena podendo ser então considerada nula. Em outros termos, t_1 define o limite de uma "zona de conforto" a partir do qual surge este tipo de carga.

t_2 - é a temperatura em que uma saturação é atingida, quando todos os aparelhos de condicionamento de ar e refrigeradores já estariam então em seus níveis máximos de consumo em função da alta temperatura observada.

u^* - é o valor máximo deste tipo de carga.

A rigor, a função introduzida deveria depender também do padrão de carga e da hora, pois durante a noite e nos domingos e feriados o condicionamento de ar dos escritórios, lojas, etc, estaria inoperante. Entretanto as tentativas feitas neste sentido não introduziram significantes melhoras no modelo sendo então abandonadas em favor da simpli-

cidade. Talvez a explicação para o fato esteja numa relativa independência destas cargas de escritórios com a temperatura, sendo elas ligadas e desligadas mais em função da hora, padrão de carga e época do ano.

A função acima poderia facilmente ser estendida de forma a adaptar-se a outras regiões onde também fosse significativa a presença de equipamentos elétricos de aquecimento. Nesse caso a função $U(T)$ seria tal como mostrada na ilus-tração 2.4-3.

Em geral, valores extremos como u^* , podem ser estimados a partir do número de equipamentos de refrigeração instalados, e/ou de calefação se for o caso, e de seus consu-mos respectivos. Os pontos de transição como t_1 e t_2 de finem zonas que estão diretamente relacionadas com o con-forto do consumidor, podendo então ser obtidos a partir de estudos sobre seus hábitos. Estes valores são mais ou menos permanentes só vindo a se modificar em caso de mudanças destes mesmos hábitos. Neste trabalho, na ausência deste tipo mais preciso de informação, os valores de t_1 , t_2 e u^* , foram obtidos a partir das observações da carga no passado, de modo a minimizar a variância não explicada pela componente periódica e pela componente de flutuação em função da temperatura. Isto é, t_1 , t_2 e u^* foram escolhidos minimizando na equação (1), com observa-ções de carga e de temperatura do passado, o somatório:

$$\sum_{h,d,p} w^2(h,d,p)$$

Sendo os valores encontrados:

$$t_1 = 22^{\circ}\text{C}$$

$$t_2 = 32^{\circ}\text{C}$$

$$u^* = 0.121 \text{ p.u.}$$

O valor $u^* = 0.121$ p.u., multiplicado pela tendência v de cerca de 1300 MW médios em janeiro de 1978 indicaria a presença de 160 MW deste tipo de carga instalados no sistema.

Sendo T uma variável aleatória, $U(T)$ acima definida também o será. Em particular haverá interesse em se conhecer o valor esperado e variância de $U(T)$. Admitindo que T obedece a uma distribuição normal com valor esperado $E[T]$ e desvio padrão $S[T]$, então é possível calcular o valor esperado $E[U(T)]$ e variância $S^2[U(T)]$. Assim, pode-se mostrar que:

$$\begin{aligned}
 E[U(T)] = & u^* + \frac{u^*}{t_2 - t_1} \cdot \left\{ (t_1 - E[T]) \cdot \phi\left(\frac{t_1 - E[T]}{S[T]}\right) + \right. \\
 & \left. - (t_2 - E[T]) \cdot \phi\left(\frac{t_2 - E[T]}{S[T]}\right) + \right. \\
 & \left. + S[T] \cdot \left\{ \phi\left(\frac{t_1 - E[T]}{S[T]}\right) - \phi\left(\frac{t_2 - E[T]}{S[T]}\right) \right\} \right\} \quad (6)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 S^2[U(t)] = & \left(\frac{u^*}{t_2 - t_1}\right)^2 \cdot \left\{ S[T] \cdot (2t_1 - t_2 - E[T]) \cdot \phi\left(\frac{t_2 - E[T]}{S[T]}\right) + \right. \\
 & - S[T] \cdot (t_1 - E[T]) \cdot \phi\left(\frac{t_1 - E[T]}{S[T]}\right) + \\
 & + \{(t_1 - E[T])^2 + S^2[T] - (t_2 - t_1)^2\} \cdot \phi\left(\frac{t_2 - E[T]}{S[T]}\right) + \\
 & \left. - \{(t_1 - E[T])^2 + S^2[T]\} \cdot \phi\left(\frac{t_1 - E[T]}{S[T]}\right) \right\} + u^{*2} - E^2[U(T)] \quad (7)
 \end{aligned}$$

onde:

$$\phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2}x^2} \quad \text{é a função densidade de probabilidade de normal padrão}$$

$\phi(t) = \int_{-\infty}^t \phi(n)dn$ é a função de distribuição de probabilidade normal padrão

Com referência a equação (1), e notando que em $y(h,d,p)$ está incluído o efeito que o próprio comportamento periódico da temperatura introduz na carga do sistema, através da parcela de carga $U(T(h,d))$, é fácil ver que esta última se relaciona com a flutuação $F(h,d)$ do seguinte modo:

$$F(h,d) = U(T(h,d)) - E[U(T(h,d))] \quad (8)$$

A primeira parcela é dada pela substituição de T por $T(h,d)$ na equação (5). Analogamente, a segunda parcela é dada substituindo-se $E[T]$ e $S[T]$ respectivamente por $E[T(h,d)]$ e $S[(h,d)]$ na equação (6). Na fase de estimação dos parâmetros do modelo foi possível obter, desta maneira, os valores amostrais $f(h,d)$ a partir dos valores observados de temperatura $t(h,d)$. Com isto, pode-se isolar os valores amostrais da componente residual $w(h,d,p)$, cujo tratamento é descrito no próximo capítulo.

Os valores de $E[T(h,d)]$ e $S[T(h,d)]$, necessários para avaliação da equação (6) para obtenção de (8), foram calculados a partir de um banco de dados contendo observações horárias de temperatura no Aeroporto Santos Dummont no Rio de Janeiro, de 1971 a 1977. O valor esperado da temperatura, em cada hora ao longo do ano, foi representado no modelo por uma série truncada de Fourier com 3 harmônicos.

A ilustração 2.4-4 mostra um caso típico destes ajustamentos. Como pode ser ali constatado, as observações tendem a se espalhar de uma maneira uniforme em torno do valor esperado da temperatura para as diversas épocas do ano. Em vista disto pareceu razoável considerar-se a variância da temperatura como invariante em d : $S^2[T(h,.)]$. De fato, testes estatísticos vieram comprovar esta hipótese. Por outro lado, a mesma dispersão das observações varia apreciavelmente para diferentes horas do dia, com o que deci-

diu-se considerar variâncias distintas para cada hora do dia. A tabela 2.4-1 mostra esta fato.

A previsão de carga k horas a frente será feita a partir das informações disponíveis até a hora presente. Em particular, será necessário determinar o valor esperado e a variância da flutuação de carga dependente da temperatura, que, por sua vez, é função da própria temperatura. Admitindo-se por simplicidade que toda a informação sobre a evolução da temperatura está sintetizada em $t(h,d)$ tem-se, a partir da equação (8):

$$E[F(T(h+k,d)|t(h,d))] = E[U(T(h+k,d)|t(h,d))] + \\ -E[U(T(h+k,d))] \quad (9)$$

Sendo a variância dada por:

$$S^2[F(T(h+k,.)|t(h,d))] = S^2[U(T(h+k,.)|t(h,d))] \quad (10)$$

Na equação (9), o $E[U(T(h+k,d))]$ é obtido a partir da equação (6) onde $E[T]$ e $S[T]$ são substituídos respectivamente pelos valores marginais, $E[T(h,d)]$ e $S[T(h,.)]$, já mencionados. Por outro lado, $E[U(T(h+k,d)|t(h,d))]$ e $S^2[U(T(h+k,.)|t(h,d))]$, que aparecem nas equações (9) e (10), são obtidos pela substituição de $E[T]$ e $S[T]$ respectivamente pelos valores condicionais, $E[T(h+k,d)|t(h,d)]$ e $S[T(h+k,.)|t(h,d)]$ nas equações (6) e (7). O ideal seria que estes valores, que constituem uma previsão de temperatura, pudessem ser fornecidos pelo Serviço de Meteorologia, que dispõe de métodos e informações adequados a este fim. Neste trabalho, ainda que sob risco de prejudicar o desempenho do modelo, decidiu-se por não adotar este procedimento, devido a inviabilidade de se coletar e processar as previsões feitas no passado. Em substituição, adotou-se, como modelo de previsão de temperatura, uma simples regressão linear, a ser descrita no item 3.1.

2.5 Componente Residual: $W(h,d)$

A componente residual, representa a aleatoriedade da carga em relação às duas parcelas descritas nos itens anteriores. Por hipótese ela tem valor esperado nulo, e uma dispersão que, em princípio, poderia variar com o padrão de carga, a época do ano e a hora do dia. Variâncias calculadas a partir dos resíduos obtidos no período de 1976 à 1977, foram então analisados sob diversos aspectos.

A tabela 2.5-1 mostra os desvios padrões amostrais de $W(h,d,p)$ para diferentes valores de h e p . Nota-se diferenças significativas entre estes valores, suficientes para manter no modelo variâncias individuais para cada par (h,p) . Como pode ser observado na ilustração 2.5-1, a distribuição uniforme dos pontos em torno de zero, indica como razoável a hipótese de variância constante ao longo do ano. Resultados semelhantes foram, em geral, obtidos para outras horas com diferentes padrões de carga. As ilustrações 2.5-2 e 2.5-3 mostram dois exemplos. De forma análoga os coeficientes de correlação entre $W(h,d,p)$ e $W(h+1,d,p)$ foram calculados e, como as variâncias, são mostrados na tabela 2.5-2. Apesar de algumas excessões - verificadas basicamente durante a madrugada - decidiu-se adotar variâncias e coeficientes de correlação independentes dos dias do ano: $S[W(h,.,p)]$ e $R[W(h,.,p), W(h+1,.,p)]$.

Foram igualmente examinadas as correlações entre as componentes residuais a intervalos maiores do que 1 hora. A tabela 2.5-3 mostra alguns coeficientes de correlação de "lag" 2, $R[Q_1(h,p), Q_1(h+2,p)]$, onde $Q_1(h,p)$ é obtido pela solução da equação (11) :

$$W(h+1,d,p) = R[W(h,.,p), W(h+1,.,p)] \frac{S[W(h+1,.,p)]}{S[W(h,.,p)]} W(h,d,p) + Q_1(h,p) \quad (11)$$

Os resultados encontrados, em geral próximos de zero, encorajaram a modelar $W(h,d,p)$ à semelhança de um processo auto-regressivo de ordem 1, que reaplicado no tempo é dado por :

$$W(h+k, d, p) = \beta(h, p, k) \cdot W(h, d, p) + Q_k(h, p) \quad (12)$$

onde:

$$\beta(h, p, k) = \frac{S[W(h+k, \cdot, p)]}{S[W(h, \cdot, p)]} \prod_{j=1}^k R[W(h+j-1, \cdot, p), W(h+j, \cdot, p)] \quad (13)$$

e

$$Q_k(h, p) = Q_1(h+k-1, p) + \beta(h+k-1, p, 1) Q_{k-1}(h, p) \quad (14)$$

Para a previsão da componente residual da hora $h+k$, dado que $w(h, d, p)$ é conhecido, tem-se:

$$E[W(h+k, d, p) | w(h, d, p)] = \beta(h, p, k) \cdot w(h, d, p) \quad (15)$$

e

$$S^2[W(h+k, \cdot, p) | w(h, d, p)] = S^2[W(h+k, \cdot, p)] + S^2[W(h, \cdot, p)] \cdot \beta^2(h, p, k) \quad (16)$$

3- APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

3.1 Algoritmo de Previsão

O problema que se apresenta é basicamente composto de duas etapas distintas, a saber:

- Estimação dos parâmetros do modelo

Esta fase, de execução tipicamente "off-line", é composta de um conjunto de procedimentos necessários à estimação dos parâmetros integrantes do modelo proposto e que foram descritos na seção 2 deste trabalho. Uma vez calculados, estes parâmetros permanecem invariáveis durante um certo período de tempo. Estima-se que esta fase deva ser executada a cada um ou dois meses.

- Previsão de Carga

É executada constantemente, no dia a dia da operação. Com os parâmetros estimados na fase anterior, esta etapa consiste na aplicação do modelo ao longo do tempo.

A previsão de carga k horas adiante é dada por:

$$E[C(h+k,d,p,a)|c(h,d,p,a), t(h,d)] = v(d,a)\{y(h,d,p) + E[F(T(h+k,d)|t(h,d))] + E[W(h+k,d,p)w(h,d,p)]\} \quad (17)$$

A variância associada à previsão da carga para o instante h+k é fornecida por:

$$S^2[C(h+k,d,p,a)|c(h,d,p,a), t(h,d)] = \{S^2[F(T(h+k,.)|t(h,d))] + S^2[W(h+k,.,p)|w(h,d,p)]\} \cdot v^2(d,a) \quad (18)$$

cujas parcelas foram definidas anteriormente.

Conforme descrito no item 2.4, as variações de temperatura em torno de seu valor esperado vão se refletir em flutuações de carga em torno de sua componente periódica. Adotou-se neste trabalho, para fins de simulação e validação do modelo, um esquema simplificado de previsão de temperatura, dado pela equação abaixo:

$$E[T(h+k,d)|t(h,d)] = E[T(h+k,d)] + \frac{R[T(h,.),T(h+k,.)]S[T(h+k,.)]}{S[T(h,.)]} \cdot \{T(h,d) - E[T(h,d)]\} \quad (19)$$

Os valores de $R[T(h,.),T(h+k,.)]$, que constituem as correlações entre temperaturas supostas independentes de d, são mostradas na tabela 3.1-1 para "lags" (k) de 1 até 24.

A variância associada a esta estimativa é dada por:

$$S^2[T(h+k,.)|t(h,d)] = S^2[T(h+k,.)] \cdot (1 - R^2[T(h,.),T(h+k,.)]) \quad (20)$$

Cabe lembrar que nas equações acima, $E[T(h,d)]$, $S[T(h,.)]$, $R[T(h,.),T(h+k,.)]$, $E[F(T(h,d))]$ e outros, representam propriedades de população, sendo portanto desconhecidos. As estimativas $\hat{E}[T(h,d)]$, $\hat{S}[T(h,.)]$, etc. obtidas através dos métodos descritos na seção 2, são consideradas como se fossem valores de população. Cumpre notar que, em consequên

cia, os valores de variâncias obtidos pela aplicação da equação (18) serão inferiores aos valores reais, uma vez que as variâncias dos estimadores não foi considerada.

3.2 Uma Aplicação do Modelo

A título de ilustração, é apresentada a previsão de carga para a semana de 9 às 15 de janeiro de 1978, utilizando na estimação dos parâmetros, dados medidos até dezembro de 1977.

A ilustração 3.2-1 compara, ao longo de toda uma semana, a previsão feita com 1 hora de antecedência ($k=1$) com a carga efetivamente observada. Na parte inferior do gráfico encontram-se os erros da previsão, envoltos por uma faixa de um desvio padrão, dado pela equação (18). As ilustrações 3.2-2 a 3.2-4 mostram gráficos análogos, em que os tempos de previsão são respectivamente de 2, 3 e 24 horas de antecedência. Comparando-se as quatro ilustrações nota-se que os erros aumentam à medida que o intervalo de previsão cresce, como aliás seria de se esperar.

As previsões feitas numa hora específica, para as 24 horas seguintes ($k=1,2, \dots, 24$) são mostradas na ilustração 3.2-5. Neste gráfico figuram, além da previsão e da carga efetivamente ocorrida, a parcela periódica da carga, $v(d,a).y(h,d,p)$. É interessante notar a precisão da previsão para pequenos intervalos de tempo. À medida que o intervalo aumenta, a previsão vai se aproximando da parcela periódica e se distanciando dos valores observados. Para $k = 24$ a previsão e a parcela periódica já são praticamente coincidentes. Isto indica que as informações adicionadas pelo conhecimento da temperatura e da última observação da carga são úteis apenas para baixos valores de k . É possível, entretanto, que houvesse uma influência mais duradoura se a previsão de temperatura fosse realizada com maior precisão, em função de condições meteorológicas. Na parte inferior da figura é mostrado o desvio padrão que, como esperado, tende a crescer com o aumento de k . As flutuações do desvio padrão, observadas ao lon

go do tempo, têm origem nas características distintas da carga para cada hora.

Na tabela 3.2-1 são apresentados, para esta mesma semana, os valores máximo e médio dos valores absolutos dos erros relativos percentuais de previsão. Os mesmos valores são também apresentados para a previsão constituindo-se apenas da parcela periódica.

Nota-se que para $k=1$, o erro médio de previsão é 1,1%. Com apenas a parcela periódica como previsão, o erro é de 2,9%. Por outro lado, para $k=24$, estes erros passam a ser respectivamente: 2,6% e 2,9%.

4- NOVOS DESENVOLVIMENTOS - CONCLUSÕES

Nos testes iniciais, o modelo descrito tem apresentado erros absolutos médios de 1% a 2% em previsões com uma hora de antecedência e de 2% a 3% em previsões com vinte e quatro horas de antecedência. Comparações são sempre difíceis, pois o desempenho depende em parte das características específicas da própria carga do sistema ao qual cada modelo é aplicado. Acredita-se, entretanto, que os resultados aqui obtidos satisfaçam plenamente os requisitos da operação.

O projeto iniciado em meados de 1978 deve se estender ainda até princípios de 1980. Novos aperfeiçoamentos estão sendo considerados, e sua implementação dependerá entre outras coisas do eventual interesse das empresas do setor elétrico. Os programas já desenvolvidos destinaram-se mais à investigação propriamente dita, não se constituindo portanto, até o momento, num pacote operacional para uso sistemático. Tenciona-se, neste sentido, aperfeiçoar as necessárias "interfaces" entre os programas bem como automatizar seu processo de utilização. Com isto, também se tornará mais simples submeter, como seria desejável, o modelo a testes intensivos utilizando os sete anos de dados horários disponíveis.

Como um outro aperfeiçoamento, a tendência poderia ser tratada de modo similar aos modelos de médio prazo, em que informa

ções adicionais disponíveis sobre o crescimento do mercado são convenientemente utilizadas. É igualmente interessante introduzir mecanismos que permitam incluir na previsão, informações apriorísticas que o operador eventualmente disponha sobre o comportamento da carga face a, por exemplo, um programa especial de TV, greves, jogos da Copa do Mundo, etc.. Também se pretende introduzir funções interpoladoras entre os intervalos discretos de previsão. Isto pode ser feito por meio de polinômios, "splines" ou ajustamento de séries de Fourier.

Outra linha de investigação de muita importância é a previsão associada às barras do sistema. Neste caso o modelo deve fornecer não apenas previsões e intervalos de confiança para todas as barras do sistema, mas também representar o comportamento dos consumidores ligados a cada barramento.

Possivelmente isto poderá ser obtido com o emprego de técnica de desagregação [9] através da qual se adotaria, por exemplo, uma equação do tipo:

$$\underline{X} = \underline{A}\underline{C} + \underline{B}\underline{Z} \quad (21)$$

Onde $\underline{X}$ é o vetor das n cargas nas barras, $\underline{C}$ é a carga total do sistema e $\underline{A}$ é um vetor de "fatores de participação". $\underline{Z}$ de dimensão m , é um vetor de variáveis aleatórias independentes e $\underline{B}$ é uma matriz $n \times m$. O vetor $\underline{A}$ e a matriz $\underline{B}$ deverão ser estimados de modo a conservar diversas propriedades da série temporal registrada no passado. Também $\underline{A}$ e $\underline{B}$ devem garantir que a soma das componentes de $\underline{X}$ seja igual a $\underline{C}$. Uma aplicação deste tipo de metodologia, embora no contexto de séries temporais hidrológicas é dado em [10].

5- AGRADECIMENTOS

À Light - Serviços de Eletricidade S.A., por ter cedido os dados da carga do Sistema Rio.

Ao Serviço de Proteção ao Voo, do Ministério da Aeronáutica, pelos dados de temperatura do Aeroporto Santos Dummont.

Ao Sr. Mauro Prais por ter desenvolvido, com empenho e eficiência, grande parte das computações aqui apresentadas.

BIBLIOGRAFIA

- (1) ELETROBRÁS (DOS), "Requisitos para o planejamento, coordenação e análise da operação do sistema interligado do Brasil", Março 1978.
- (2) ABREU, F.A.L., "Previsão de carga a curto prazo", Notas do Curso "Funções de Monitoração e Controle em Tempo Real de Sistemas Elétricos", IEEE, Rio de Janeiro, Setembro 1978.
- (3) GALIANA, R.D. "Short term load forecasting", System Engineering for Power: Status and Projects, Henniker, New Hampshire, August 1975.
- (4) BROWN, M.C., "Previsão de carga a curto prazo por modelagem estocástica", Tese M. Sc., COPPE-UFRJ, 1978
- (5) SACHDEV, M.S.; BILLINTON, R.; PETERSON, C.A., "Representative bibliography on load forecasting", IEEE Trans. Vol. PAS-96, Mar/Apr 1977
- (6) PAZITO, L.E.M., BASÍLIO R.P. "Método Bayesiano de previsão de séries temporais. Aplicação a uma série de demanda de energia elétrica", Anais da XI Reunião da SOBRAPO, Brasília 1978
- (7) ELETROBRÁS (DPE), "Metodologia para o planejamento da expansão do sistema elétrico brasileiro", Junho 1978
- (8) DNAEE-Ministério das Minas e Energia, "Metodologia para projeções de mercado", Junho 1976
- (9) VALENCEIA, R.D.; SCHAAKE, J.C.; "Disaggregation processes in stochastic hydrology", Water Resources Research 9(3), 1973
- (10) KELMAN, J.; COUTO, G.; DEFEIRA, M.V.P.; "Geração de séries hidrológicas - método de desagregação", V SNPTEE, Recife Novembro 1977.

PADRÃO DE CARGA 1

π	$\pi_{0.01}$	$\pi_{0.02}$	$\pi_{0.03}$	$\pi_{0.04}$	$\pi_{0.05}$	$\pi_{0.06}$	$\pi_{0.07}$	$\pi_{0.08}$	$\pi_{0.09}$	$\pi_{0.10}$	$\pi_{0.11}$	$\pi_{0.12}$	$\pi_{0.13}$	$\pi_{0.14}$	$\pi_{0.15}$	$\pi_{0.16}$	$\pi_{0.17}$	$\pi_{0.18}$	$\pi_{0.19}$	$\pi_{0.20}$	$\pi_{0.21}$	$\pi_{0.22}$	$\pi_{0.23}$	$\pi_{0.24}$	$\pi_{0.25}$	$\pi_{0.26}$	$\pi_{0.27}$	$\pi_{0.28}$	$\pi_{0.29}$	$\pi_{0.30}$	$\pi_{0.31}$	$\pi_{0.32}$	$\pi_{0.33}$	$\pi_{0.34}$	$\pi_{0.35}$	$\pi_{0.36}$	$\pi_{0.37}$	$\pi_{0.38}$	$\pi_{0.39}$	$\pi_{0.40}$	$\pi_{0.41}$	$\pi_{0.42}$	$\pi_{0.43}$	$\pi_{0.44}$	$\pi_{0.45}$	$\pi_{0.46}$	$\pi_{0.47}$	$\pi_{0.48}$	$\pi_{0.49}$	$\pi_{0.50}$	$\pi_{0.51}$	$\pi_{0.52}$	$\pi_{0.53}$	$\pi_{0.54}$	$\pi_{0.55}$	$\pi_{0.56}$	$\pi_{0.57}$	$\pi_{0.58}$	$\pi_{0.59}$	$\pi_{0.60}$	$\pi_{0.61}$	$\pi_{0.62}$	$\pi_{0.63}$	$\pi_{0.64}$	$\pi_{0.65}$	$\pi_{0.66}$	$\pi_{0.67}$	$\pi_{0.68}$	$\pi_{0.69}$	$\pi_{0.70}$	$\pi_{0.71}$	$\pi_{0.72}$	$\pi_{0.73}$	$\pi_{0.74}$	$\pi_{0.75}$	$\pi_{0.76}$	$\pi_{0.77}$	$\pi_{0.78}$	$\pi_{0.79}$	$\pi_{0.80}$	$\pi_{0.81}$	$\pi_{0.82}$	$\pi_{0.83}$	$\pi_{0.84}$	$\pi_{0.85}$	$\pi_{0.86}$	$\pi_{0.87}$	$\pi_{0.88}$	$\pi_{0.89}$	$\pi_{0.90}$	$\pi_{0.91}$	$\pi_{0.92}$	$\pi_{0.93}$	$\pi_{0.94}$	$\pi_{0.95}$	$\pi_{0.96}$	$\pi_{0.97}$	$\pi_{0.98}$	$\pi_{0.99}$	$\pi_{1.00}$
1	0.010	0.020	0.030	0.040	0.050	0.060	0.070	0.080	0.090	0.100	0.110	0.120	0.130	0.140	0.150	0.160	0.170	0.180	0.190	0.200	0.210	0.220	0.230	0.240	0.250	0.260	0.270	0.280	0.290	0.300	0.310	0.320	0.330	0.340	0.350	0.360	0.370	0.380	0.390	0.400	0.410	0.420	0.430	0.440	0.450	0.460	0.470	0.480	0.490	0.500	0.510	0.520	0.530	0.540	0.550	0.560	0.570	0.580	0.590	0.600	0.610	0.620	0.630	0.640	0.650	0.660	0.670	0.680	0.690	0.700	0.710	0.720	0.730	0.740	0.750	0.760	0.770	0.780	0.790	0.800	0.810	0.820	0.830	0.840	0.850	0.860	0.870	0.880	0.890	0.900	0.910	0.920	0.930	0.940	0.950	0.960	0.970	0.980	0.990	1.000
2	0.015	0.030	0.045	0.060	0.075	0.090	0.105	0.120	0.135	0.150	0.165	0.180	0.195	0.210	0.225	0.240	0.255	0.270	0.285	0.300	0.315	0.330	0.345	0.360	0.375	0.390	0.405	0.420	0.435	0.450	0.465	0.480	0.495	0.510	0.525	0.540	0.555	0.570	0.585	0.600	0.615	0.630	0.645	0.660	0.675	0.690	0.705	0.720	0.735	0.750	0.765	0.780	0.795	0.810	0.825	0.840	0.855	0.870	0.885	0.900	0.915	0.930	0.945	0.960	0.975	0.990	1.000																																	
3	0.020	0.040	0.060	0.080	0.100	0.120	0.140	0.160	0.180	0.200	0.220	0.240	0.260	0.280	0.300	0.320	0.340	0.360	0.380	0.400	0.420	0.440	0.460	0.480	0.500	0.520	0.540	0.560	0.580	0.600	0.620	0.640	0.660	0.680	0.700	0.720	0.740	0.760	0.780	0.800	0.820	0.840	0.860	0.880	0.900	0.920	0.940	0.960	0.980	1.000																																																		
4	0.025	0.050	0.075	0.100	0.125	0.150	0.175	0.200	0.225	0.250	0.275	0.300	0.325	0.350	0.375	0.400	0.425	0.450	0.475	0.500	0.525	0.550	0.575	0.600	0.625	0.650	0.675	0.700	0.725	0.750	0.775	0.800	0.825	0.850	0.875	0.900	0.925	0.950	0.975	1.000																																																												
5	0.030	0.060	0.090	0.120	0.150	0.180	0.210	0.240	0.270	0.300	0.330	0.360	0.390	0.420	0.450	0.480	0.510	0.540	0.570	0.600	0.630	0.660	0.690	0.720	0.750	0.780	0.810	0.840	0.870	0.900	0.930	0.960	0.990	1.000																																																																		
6	0.035	0.070	0.105	0.140	0.175	0.210	0.245	0.280	0.315	0.350	0.385	0.420	0.455	0.490	0.525	0.560	0.595	0.630	0.665	0.700	0.735	0.770	0.805	0.840	0.875	0.910	0.945	0.980	1.000																																																																							
7	0.040	0.080	0.120	0.160	0.200	0.240	0.280	0.320	0.360	0.400	0.440	0.480	0.520	0.560	0.600	0.640	0.680	0.720	0.760	0.800	0.840	0.880	0.920	0.960	1.000																																																																											
8	0.045	0.090	0.135	0.180	0.225	0.270	0.315	0.360	0.405	0.450	0.495	0.540	0.585	0.630	0.675	0.720	0.765	0.810	0.855	0.900	0.945	0.990	1.000																																																																													
9	0.050	0.100	0.150	0.200	0.250	0.300	0.350	0.400	0.450	0.500	0.550	0.600	0.650	0.700	0.750	0.800	0.850	0.900	0.950	1.000																																																																																
10	0.055	0.110	0.165	0.220	0.275	0.330	0.385	0.440	0.495	0.550	0.605	0.660	0.715	0.770	0.825	0.880	0.935	0.990	1.000																																																																																	
11	0.060	0.120	0.180	0.240	0.300	0.360	0.420	0.480	0.540	0.600	0.660	0.720	0.780	0.840	0.900	0.960	1.000																																																																																			
12	0.065	0.130	0.195	0.260	0.325	0.390	0.455	0.520	0.585	0.650	0.715	0.780	0.845	0.910	0.975	1.000																																																																																				
13	0.070	0.140	0.210	0.280	0.350	0.420	0.490	0.560	0.630	0.700	0.770	0.840	0.910	0.980	1.000																																																																																					
14	0.075	0.150	0.225	0.300	0.375	0.450	0.525	0.600	0.675	0.750	0.825	0.900	0.975	1.000																																																																																						
15	0.080	0.160	0.240	0.320	0.400	0.480	0.560	0.640	0.720	0.800	0.880	0.960	1.000																																																																																							
16	0.085	0.170	0.255	0.340	0.425	0.510	0.595	0.680	0.765	0.850	0.935	1.000																																																																																								
17	0.090	0.180	0.270	0.360	0.450	0.540	0.630	0.720	0.810	0.900	0.990	1.000																																																																																								
18	0.095	0.190	0.285	0.380	0.475	0.570	0.665	0.760	0.855	0.950	1.000																																																																																									
19	0.100	0.200	0.300	0.400	0.500	0.600	0.700	0.800	0.900	1.000																																																																																										
20	0.105	0.210	0.315	0.420	0.525	0.630	0.735	0.840	0.945	1.000																																																																																										
21	0.110	0.220	0.330	0.440	0.550	0.660	0.770	0.880	0.990	1.000																																																																																										
22	0.115	0.230	0.345	0.460	0.575	0.690	0.805	0.920	1.000																																																																																											
23	0.120	0.240	0.360	0.480	0.600	0.720	0.840	0.960	1.000																																																																																											
24	0.125	0.250	0.375	0.500	0.630	0.760	0.890	1.000																																																																																												
25	0.130	0.260	0.390	0.520	0.660	0.800	0.940	1.000																																																																																												
26	0.135	0.270	0.405	0.540	0.690	0.840	0.980	1.000																																																																																												
27	0.140	0.280	0.420	0.560	0.720	0.880	1.000																																																																																													
28	0.145	0.290	0.435	0.580	0.750	0.920	1.000																																																																																													
29	0.150	0.300	0.450	0.600	0.780	0.960	1.000																																																																																													
30	0.155	0.310	0.465	0.620	0.810	1.000																																																																																														
31	0.160	0.320	0.480	0.640	0.840	1.000																																																																																														
32	0.165	0.330	0.495	0.660	0.870	1.000																																																																																														
33	0.170	0.340	0.510	0.680	0.900	1.000																																																																																														
34	0.175	0.350	0.525	0.700	0.930	1.000																																																																																														
35	0.180	0.360	0.540	0.720	0.960	1.000																																																																																														
36	0.185	0.370	0.555	0.740	0.990	1.000																																																																																														
37	0.190	0.380	0.570	0.760	1.000																																																																																															
38	0.195	0.390	0.585	0.780	1.000																																																																																															
39	0.200	0.400	0.600	0.800	1.000																																																																																															
40	0.205	0.410	0.615	0.820	1.000																																																																																															
41	0.210	0.420	0.630	0.840	1.000																																																																																															
42	0.215	0.430	0.645	0.860	1.000																																																																																															
43	0.220	0.440	0.660	0.880	1.000																																																																																															
44	0.225	0.450	0.675	0.900	1.000																																																																																															
45	0.230	0.460	0.690	0.920	1.000																																																																																															
46	0.235	0.470	0.705	0.940	1.000																																																																																															
47	0.240	0.480	0.720	0.960	1.000																																																																																															
48	0.245	0.490	0.735	0.980	1.000																																																																																															
49	0.250	0.500	0.750	1.000																																																																																																
50	0.255	0.510	0.765	1.000																																																																																																
51	0.260	0.520	0.780	1.000																																																																																																
52	0.265	0.530	0.795	1.000																																																																																																
53	0.270	0.540	0.810	1.000																																																																																																
54	0.275	0.550	0.825	1.000																																																																																																
55	0.280	0.560	0.840	1.000																																																																																																
56	0.285	0.570	0.855	1.000																																																																																																
57	0.290	0.580	0.870	1.000																																																																																																
58	0.295	0.590	0.885	1.000																																																																																																
59	0.300	0.600	0.900	1.000																																																																																																
60	0.305	0.610	0.915	1.000																																																																																																
61	0.310	0.620	0.930	1.000																																																																																																
62	0.315	0.630	0.945	1.000																																																																																																
63	0.320	0.640	0.960	1.000																																																																																																
64	0.325	0.650	0.975	1.000																																																																																																
65	0.330	0.660	0.990	1.000																																																																																																
66	0.335	0.670	1.000																																																																																																	
67	0.340	0.680	1.000																																																																																																	
68	0.345	0.690	1.000																																																																																																	
69	0.350	0.700	1.000																																																																																																	
70	0.355	0.710	1.000																																																																																																	
71	0.360	0.720	1.000																																																																																																	
72	0.365	0.730	1.000																																																																																																	
73	0.370	0.740	1.000																																																																																																	
74	0.375	0.750	1.000																																																																																																	
75	0.380	0.760	1.000																																																																																																	
76	0.385	0.770	1.000																																																																																																	
77	0.390	0.780	1.000																																																																																																	
78	0.395	0.790	1.000																																																																																																	
79	0.400	0.800	1.000																																																																																																	
80	0.405	0.810	1.000																																																																																																	
81	0.410	0.820	1.000																																																																																																	
82	0.415	0.830	1.000																																																																																																	
83	0.420	0.840	1.000																																																																																																	
84	0.425	0.850	1.000																																																																																																	
85	0.430	0.860	1.000																																																																																																	
86	0.435	0.870	1.000																																																																																																	
87	0.440	0.880	1.000																																																																																																	
88	0.445	0.890	1.000																																																																																																	
89	0.450	0.900	1.000																																																																																																	
90	0.455	0.910	1.000																																																																																																	
91	0.460	0.920	1.000																																																																																																	
92	0.465	0.930	1.000																																																																																																	
93																																																																																																				

TABELA 2.3-1

PADRAO DE CARGA 4

* NORA *	A0	* B1 *	A2	* A3 *	B1	* B2 *	B3 *
* 1 *	0.623	* 0.061 *	0.012	* 0.002 *	0.035	* 0.025 *	-0.003 *
* 2 *	0.178	* 0.076 *	0.010	* 0.003 *	0.034	* 0.025 *	-0.005 *
* 3 *	0.754	* 0.075 *	0.009	* 0.000 *	0.031	* 0.024 *	-0.005 *
* 4 *	0.142	* 0.071 *	0.010	* 0.001 *	0.031	* 0.021 *	-0.002 *
* 5 *	0.752	* 0.062 *	0.002	* 0.001 *	0.029	* 0.022 *	-0.004 *
* 6 *	0.782	* 0.033 *	-0.003	* -0.001 *	0.031	* 0.023 *	-0.001 *
* 7 *	0.655	* 0.016 *	0.004	* 0.002 *	0.019	* 0.008 *	-0.004 *
* 8 *	1.011	* 0.098 *	0.001	* 0.005 *	0.022	* 0.010 *	-0.003 *
* 9 *	1.135	* 0.060 *	-0.004	* 0.001 *	0.033	* 0.015 *	-0.011 *
* 10 *	1.195	* 0.074 *	-0.001	* 0.002 *	0.035	* 0.013 *	-0.016 *
* 11 *	1.215	* 0.078 *	-0.008	* 0.002 *	0.030	* 0.013 *	-0.014 *
* 12 *	1.175	* 0.078 *	-0.011	* 0.000 *	0.035	* 0.012 *	-0.014 *
* 13 *	1.180	* 0.027 *	-0.005	* 0.000 *	0.037	* 0.016 *	-0.014 *
* 14 *	1.224	* 0.094 *	-0.002	* -0.001 *	0.035	* 0.021 *	-0.016 *
* 15 *	1.237	* 0.095 *	0.005	* 0.004 *	0.028	* 0.016 *	-0.014 *
* 16 *	1.243	* 0.092 *	-0.003	* 0.000 *	0.034	* 0.016 *	-0.011 *
* 17 *	1.258	* 0.071 *	-0.004	* -0.007 *	0.032	* 0.016 *	-0.015 *
* 18 *	1.317	* -0.120 *	0.000	* 0.000 *	0.030	* -0.015 *	-0.005 *
* 19 *	1.425	* -0.002 *	-0.030	* 0.001 *	-0.005	* -0.015 *	-0.026 *
* 20 *	1.415	* 0.044 *	-0.010	* -0.004 *	0.009	* 0.011 *	-0.015 *
* 21 *	1.334	* 0.053 *	0.003	* -0.004 *	0.011	* 0.012 *	-0.011 *
* 22 *	1.235	* 0.061 *	0.003	* 0.001 *	0.012	* 0.015 *	-0.007 *
* 23 *	1.093	* 0.073 *	0.003	* 0.000 *	0.015	* 0.018 *	-0.009 *
* 24 *	0.945	* 0.077 *	0.002	* -0.001 *	0.021	* 0.015 *	-0.010 *

TABELA 2.3-2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1,894	1,858	1,833	1,787	1,746	1,717	1,705	1,744	1,865	2,000	2,194	2,400

13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
2.598	2.755	2.769	2.721	2.598	2.442	2.332	2.240	2.152	2.083	1.999	1.941

Desvios padrões horários de temperatura (°C)

Tabela 2.4-1

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
DOMIN- GO	0,0331	0,0295	0,0303	0,0269	0,0301	0,0296	0,0272	0,0273	0,0266	0,0283	0,0304	0,0312
TERÇA FEIRA	0,0406	0,0415	0,0362	0,0335	0,0302	0,0302	0,0255	0,0253	0,0312	0,0344	0,0323	0,0353

	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
DOMIN- GO	0,0346	0,0378	0,0390	0,0414	0,0461	0,0505	0,0363	0,0541	0,0275	0,0266	0,0336	0,0351
TERÇA FEIRA	0,0422	0,0399	0,0412	0,0404	0,0433	0,0498	0,0351	0,0277	0,0304	0,0318	0,0374	0,0397

DESVIOS PADRÕES HORÁRIOS DA COMPONENTE RESIDUAL (W)

PARA OS PADRÕES DE CARGA DOMINGO E TERÇA-FEIRA

TABELA 2.5-1

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
DOMINGO	0,77	0,87	0,92	0,91	0,83	0,88	0,86	0,85	0,78	0,87	0,85	0,88
TERÇA-FEIRA	0,86	0,94	0,96	0,96	0,90	0,91	0,86	0,74	0,76	0,85	0,84	0,85

	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
DOMINGO	0,87	0,91	0,91	0,93	0,88	0,90	0,64	0,31	0,74	0,81	0,80	0,90
TERÇA-FEIRA	0,82	0,85	0,92	0,90	0,87	0,85	0,61	0,54	0,63	0,81	0,84	0,90

CORRELAÇÕES HORÁRIAS DA COMPONENTE RESIDUAL (W)
PARA OS PADRÕES DE CARGA DOMINGO E TERÇA-FEIRA

TABELA 2.5-2

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
DOMIN- GO	0,14	0,08	0,19	0,09	0,12	-0,02	0,03	-0,12	-0,10	0,08	-0,09	-0,05
TERÇA FEIRA	0,06	0,23	-0,17	-0,03	0,09	0,16	0,04	-0,13	0,07	0,07	-0,06	0,03

	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
DOMIN- GO	-0,21	-0,05	-0,13	- 0,09	-0,15	-0,05	-0,05	-0,20	0,26	-0,10	0,00	0,11
TERÇA FEIRA	-0,02	-0,05	-0,19	0,00	0,09	-0,02	-0,03	-0,37	0,07	0,22	-0,17	-0,07

CORRELAÇÕES HORÁRIAS ("LAG = 2") DA COMPONENTE ALEATÓRIA
INDEPENDENTE (Q) PARA OS PADRÕES DE CARGA DOMINGO E TERÇA -FEIRA

TABELA 2.5-3

HORA: 8

7	6	5	4	3	2	1	24	23	22	21	20
.92	.86	.81	.75	.69	.64	.60	.57	.56	.54	.55	.55
19	18	17	16	15	14	13	12	11	10	9	8
.56	.56	.57	.58	.59	.61	.62	.63	.64	.64	.64	.61

HORA: 20

19	18	17	16	15	14	13	12	11	10	9	8
.96	.94	.92	.90	.88	.87	.85	.84	.82	.80	.78	.77
7	6	5	4	3	2	1	24	23	22	21	20
.74	.71	.69	.66	.62	.60	.57	.55	.55	.54	.54	.54

CORRELAÇÕES ENTRE A TEMPERATURA DAS HORAS 8 (20) e as

TEMPERATURAS DE ATÉ 24 HORAS ANTERIORES

TABELA 3.1-1

	Componente Periódica	PREVISÕES K HORAS A FRENTE			
		K=1	K=2	K=3	K=24
ϵ médio (%)	2.92	1.05	1.30	2.09	2.59
ϵ máximo (%)	9.29	3.35	5.69	8.10	9.57

ERROS MÉDIO E MÁXIMO VERIFICADOS
 AO LONGO DA SEMANA DE 09/01/78
 À 15/01/78.

TABELA 3.2-1

(A) CURVA DE CARGA DO DIA 26/1/1977 - PADRÃO DE CARGA 4

(B) CURVA DE CARGA DO DIA 29/6/1977 - PADRÃO DE CARGA 4

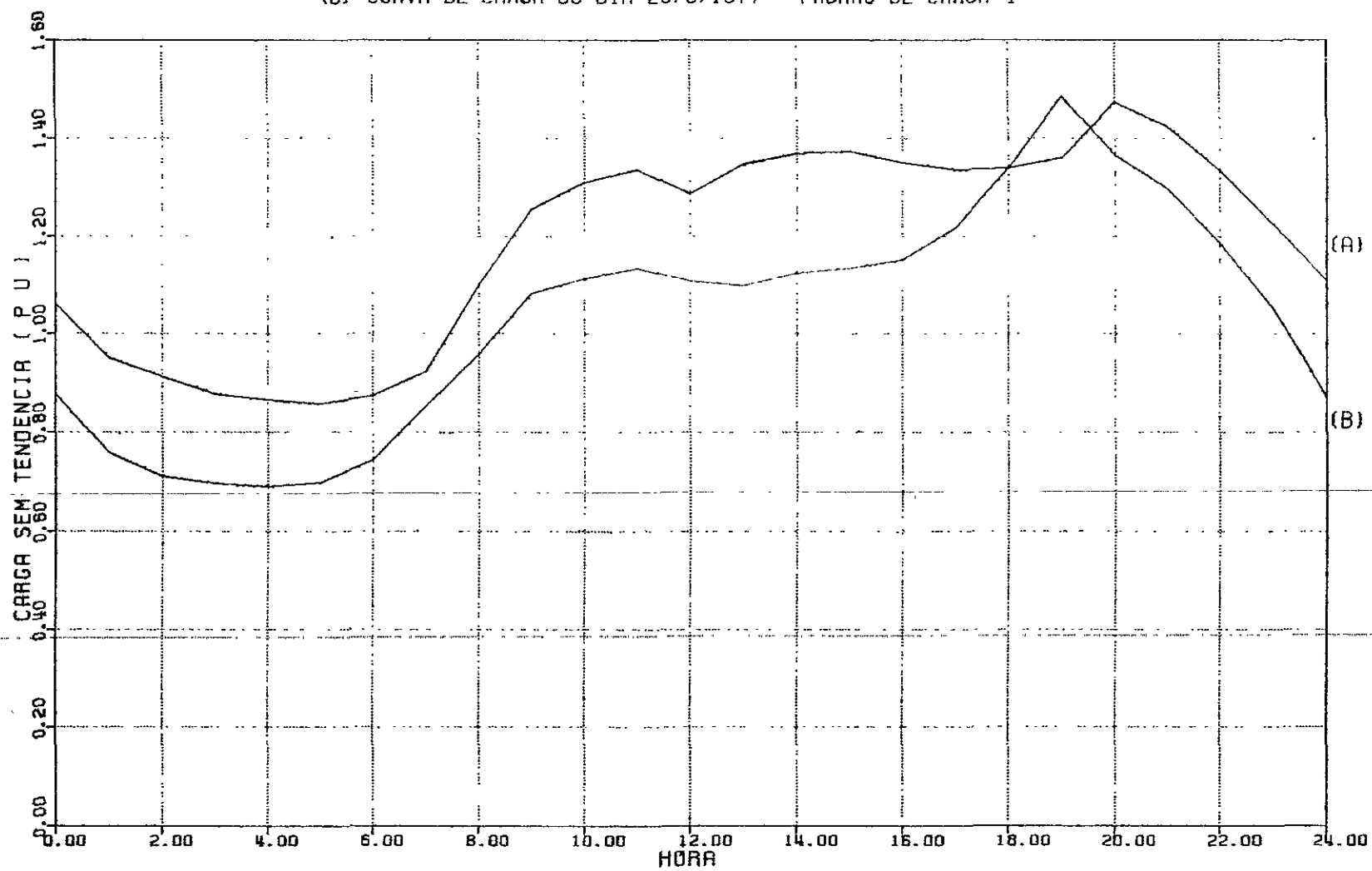
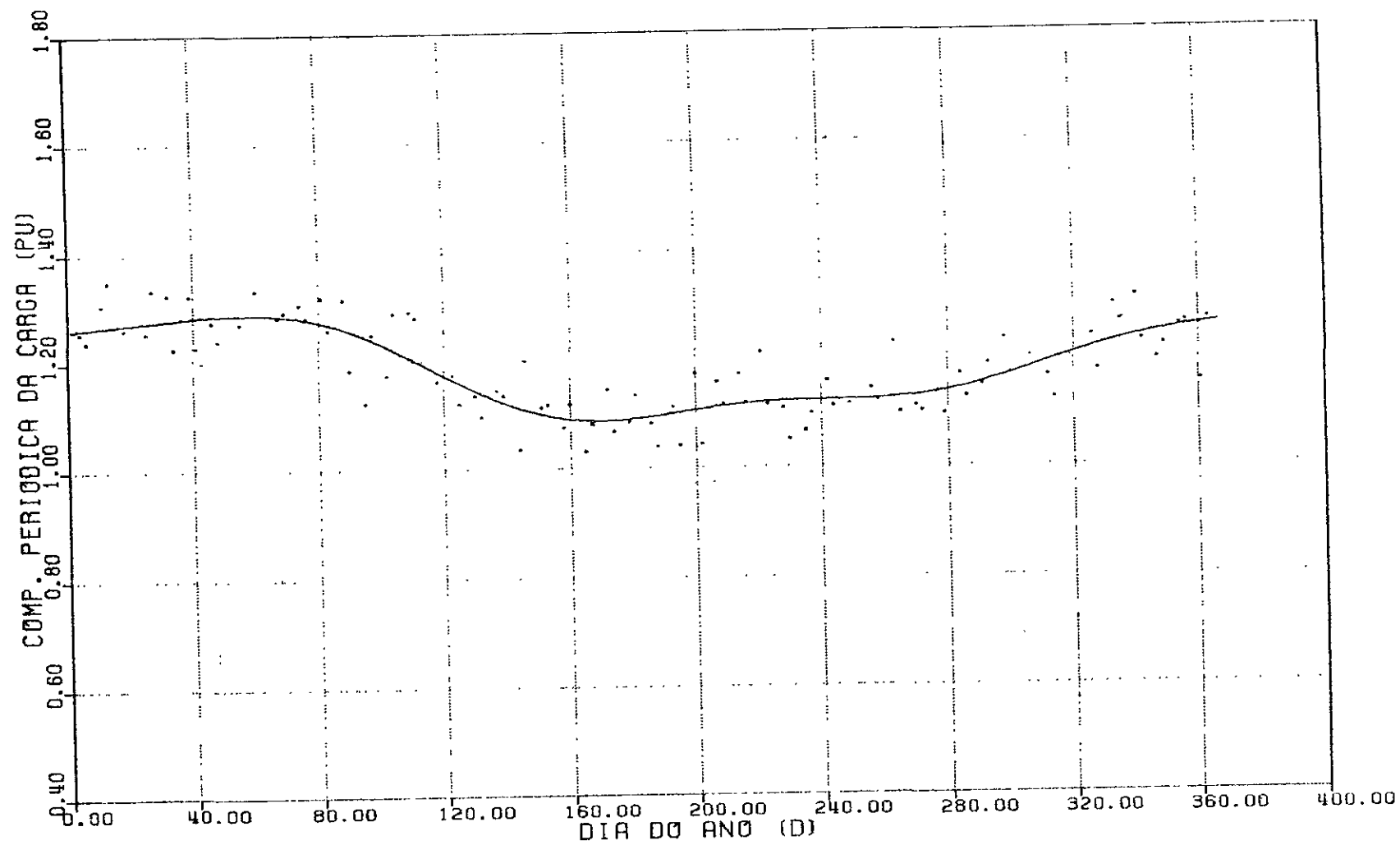


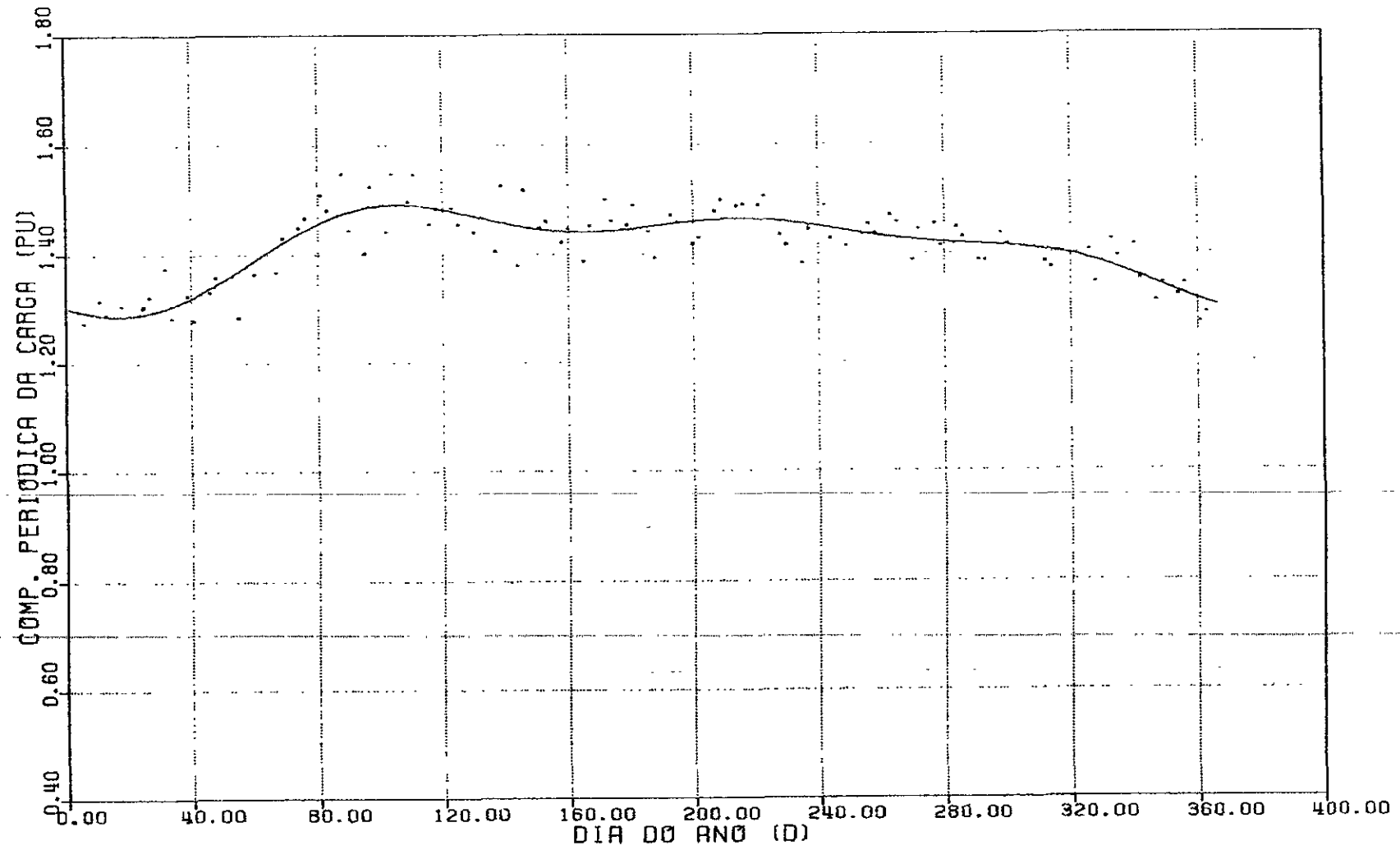
ILUSTRAÇÃO 2.3-1

VARIACAO DA COMP. PERIODICA AO LONGO DO ANO
PADRAO DE CARGA 2 HORA 13



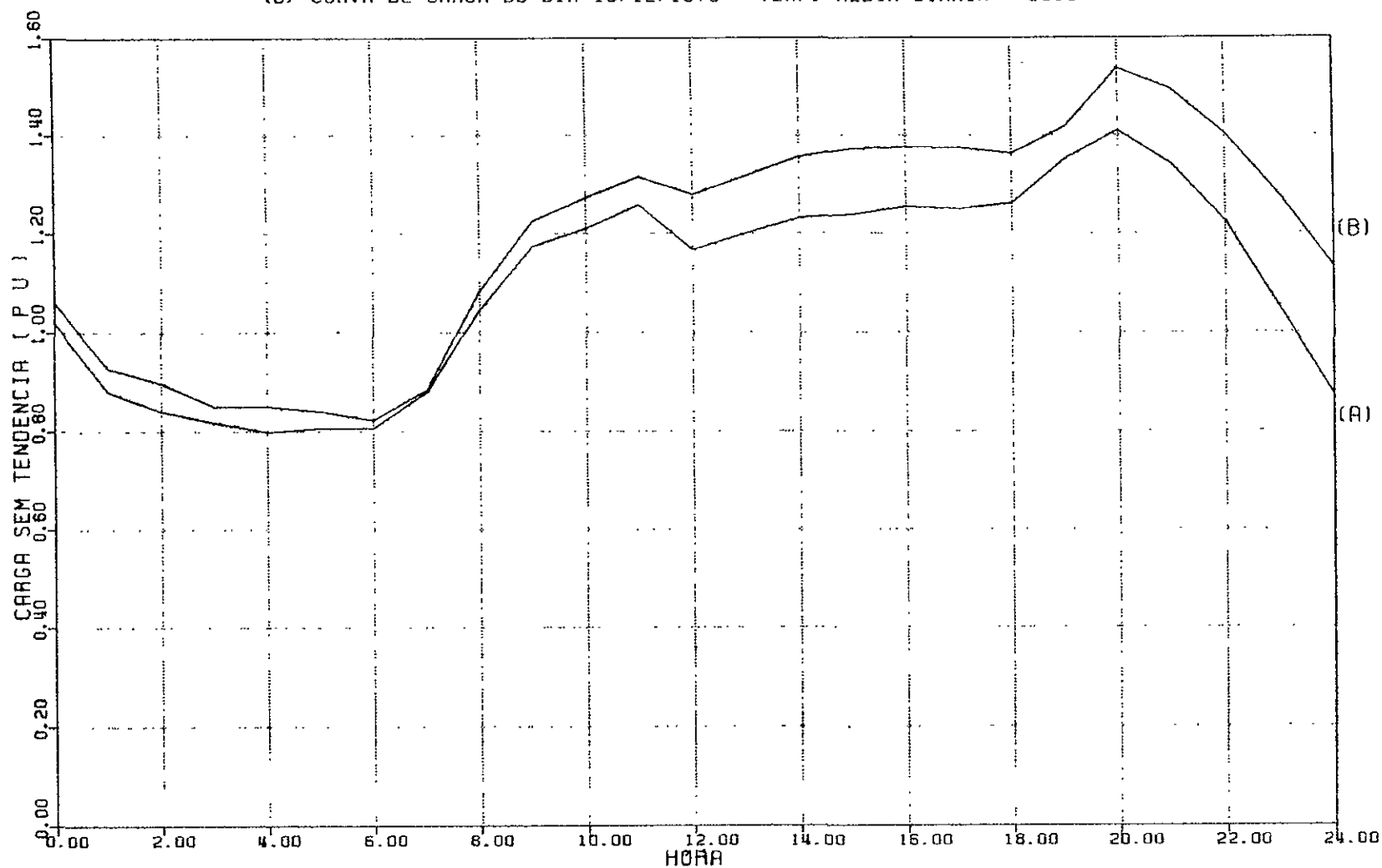
ILUSTRACAO 2.3-2

VARIACAO DA COMP. PERIODICA AO LONGO DO ANO
PADRAO DE CARGA 2 HORA 19



ILUSTRACAO 2.3-3

(A) CURVA DE CARGA DO DIA 9/12/1976 - TEMP. MEDIA DIARIA = 21.8
 (B) CURVA DE CARGA DO DIA 16/12/1976 - TEMP. MEDIA DIARIA = 30.6



ILUSTRACAO 2.4-1

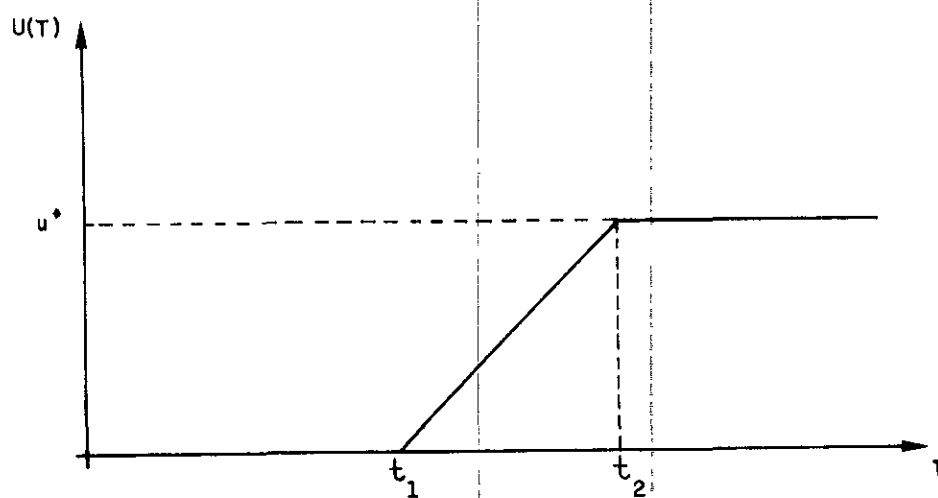


ILUSTRAÇÃO 2.4 - 2

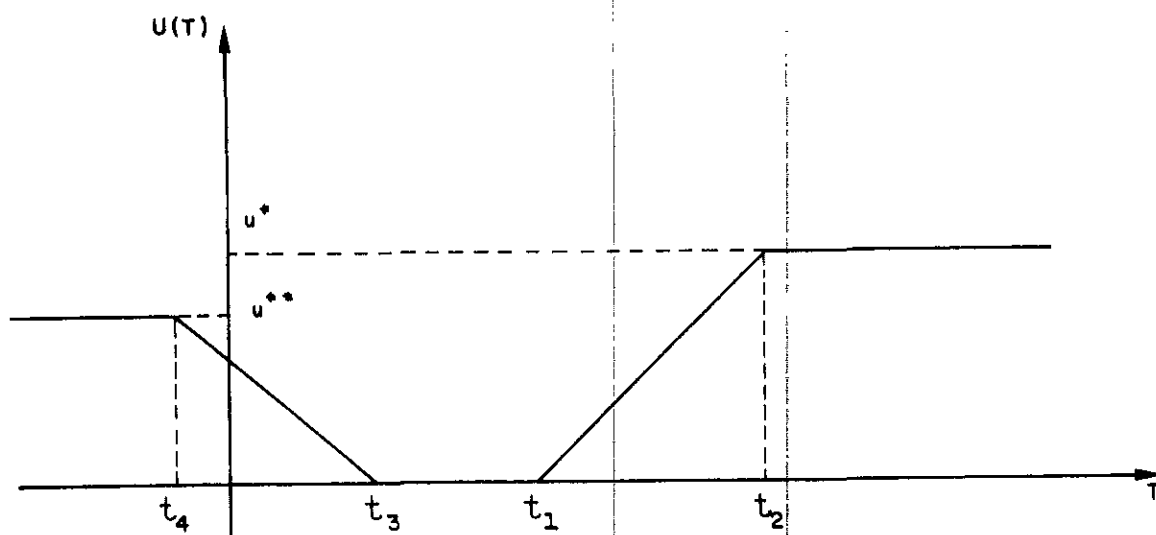


ILUSTRAÇÃO 2.4 - 3

AJUSTAMENTO DA COMP. PERIÓDICA DA TEMP. AO LONGO DO ANO

HORA : 20

ANO : 1976

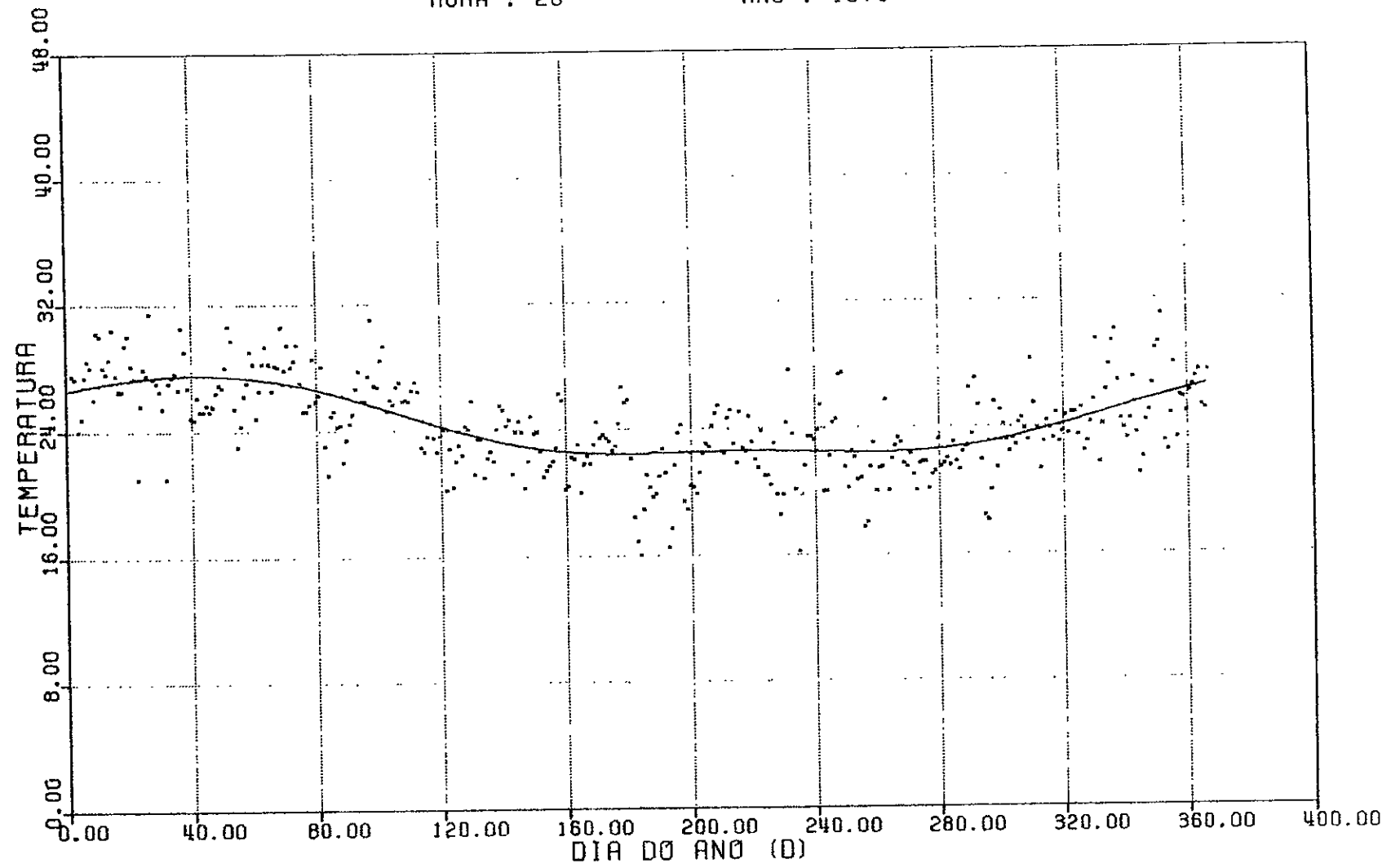


ILUSTRAÇÃO 2.4-4

PADRAO DE CARGA 3 - HORA 18

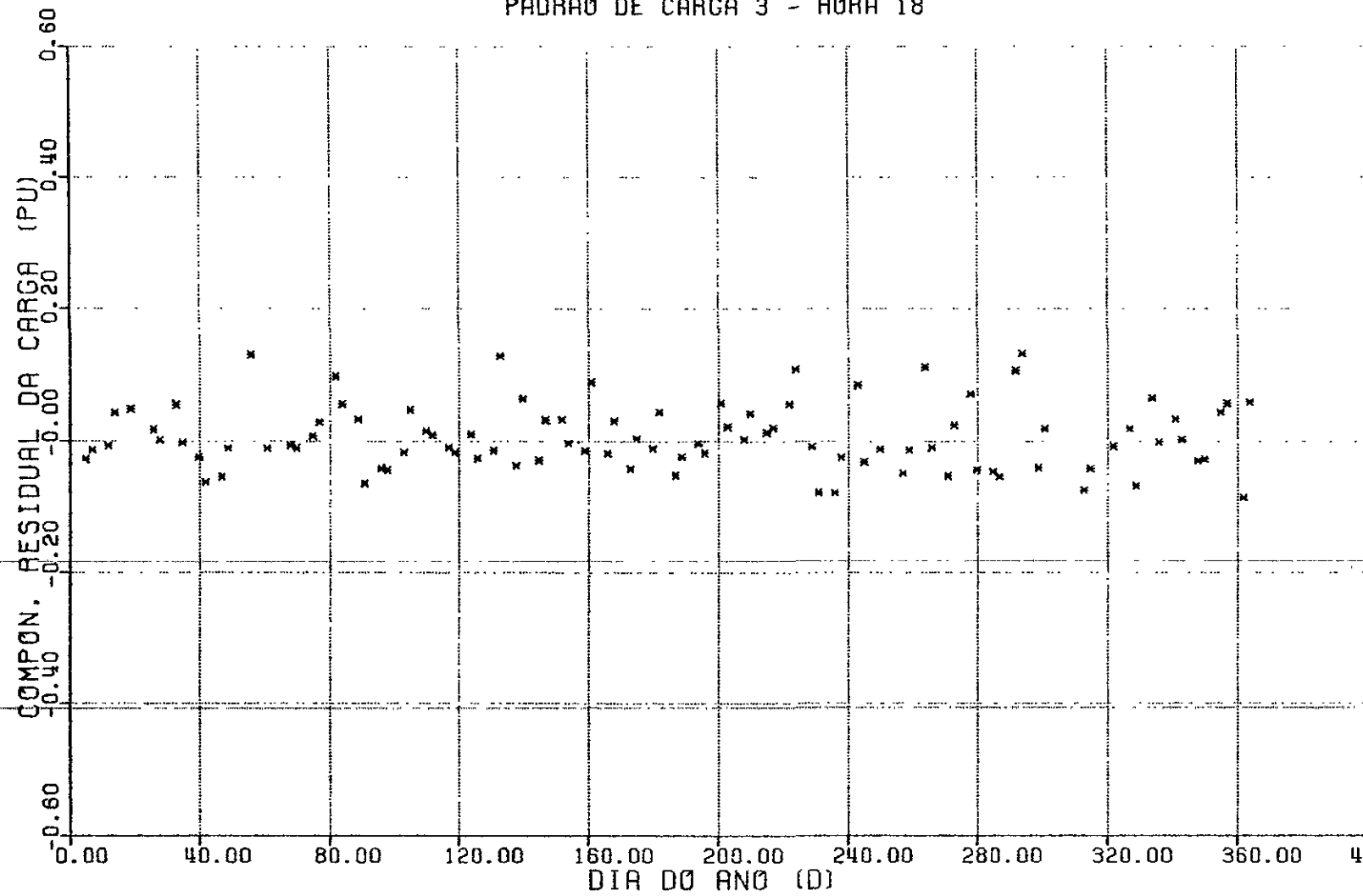
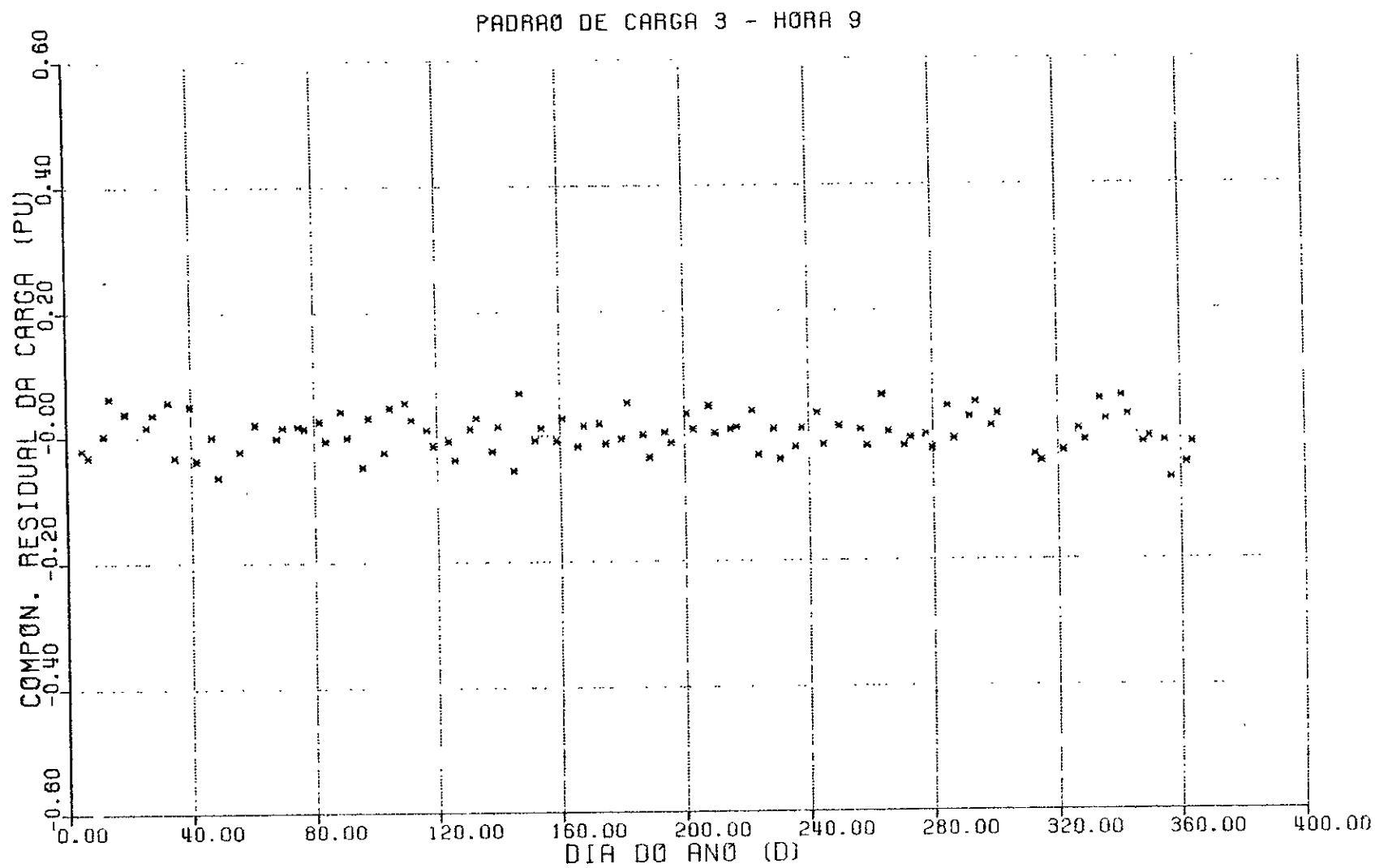


ILUSTRAÇÃO 2.5-1



ILUSTRACAO 2.5-2

PADRAO DE CARGA 1 - HORA 18

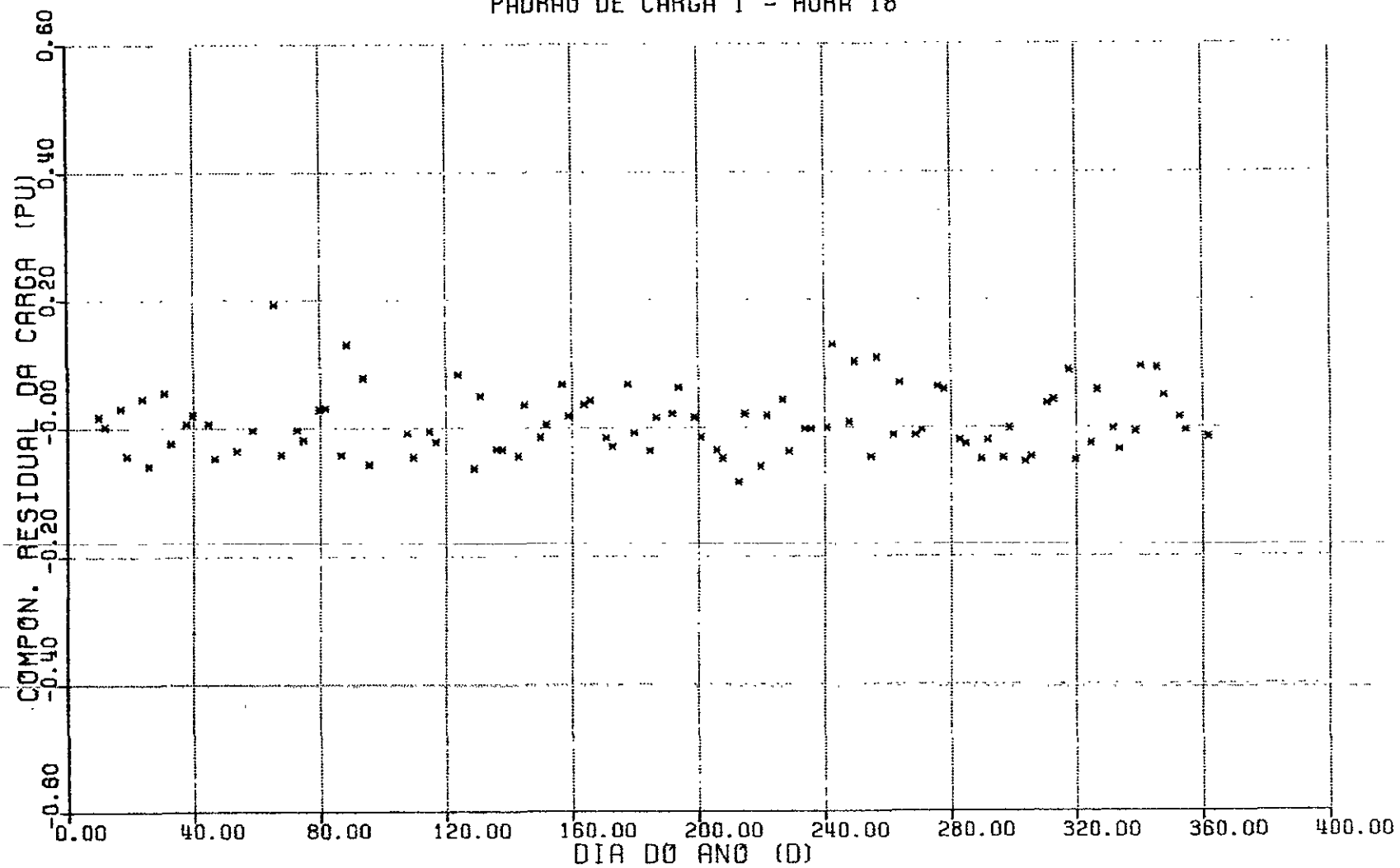


ILUSTRAÇÃO 2.5-3

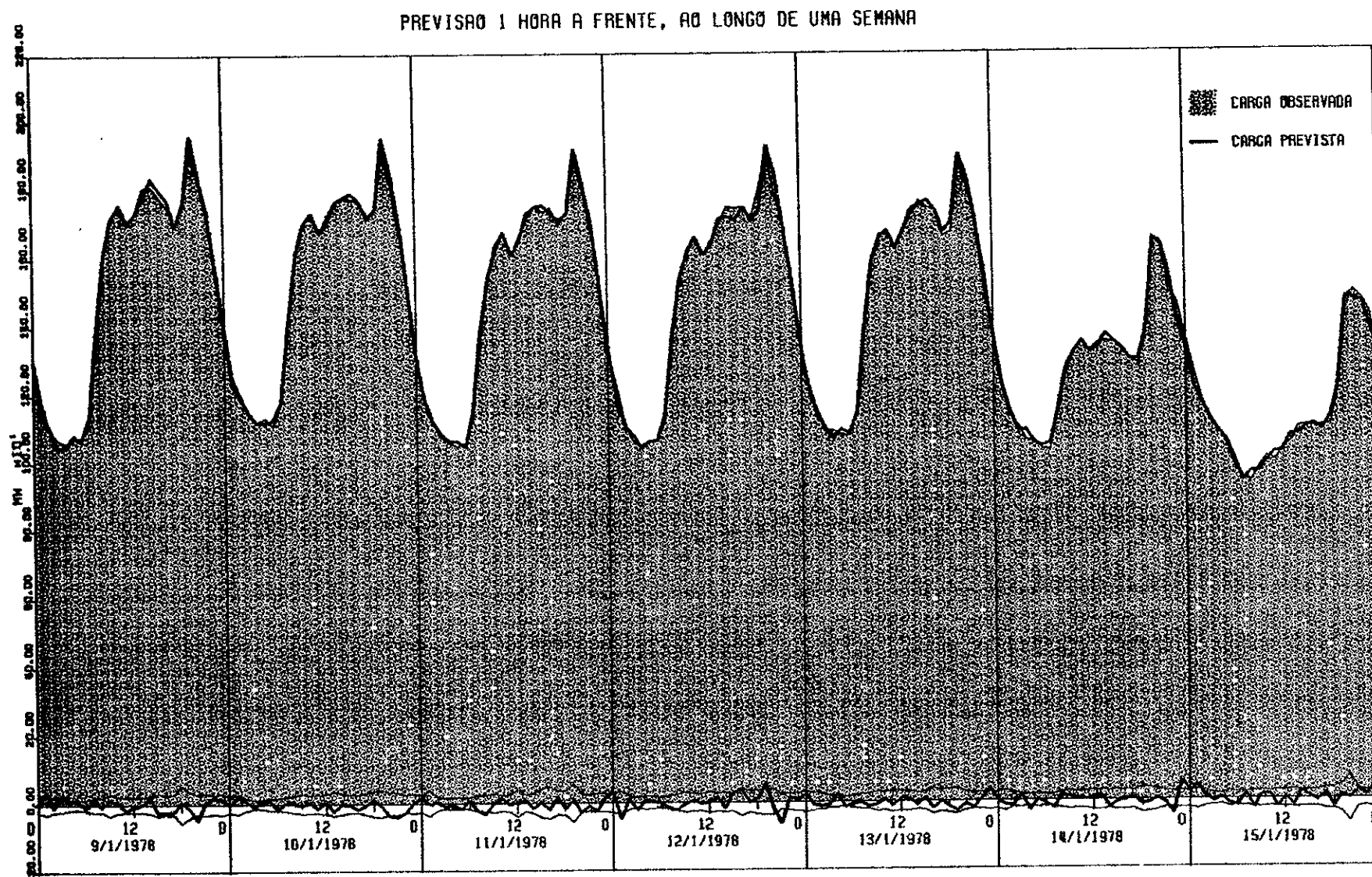


ILUSTRAÇÃO 3.2-1

PREVISÃO 2 HORAS A FRENTE, AO LONGO DE UMA SEMANA

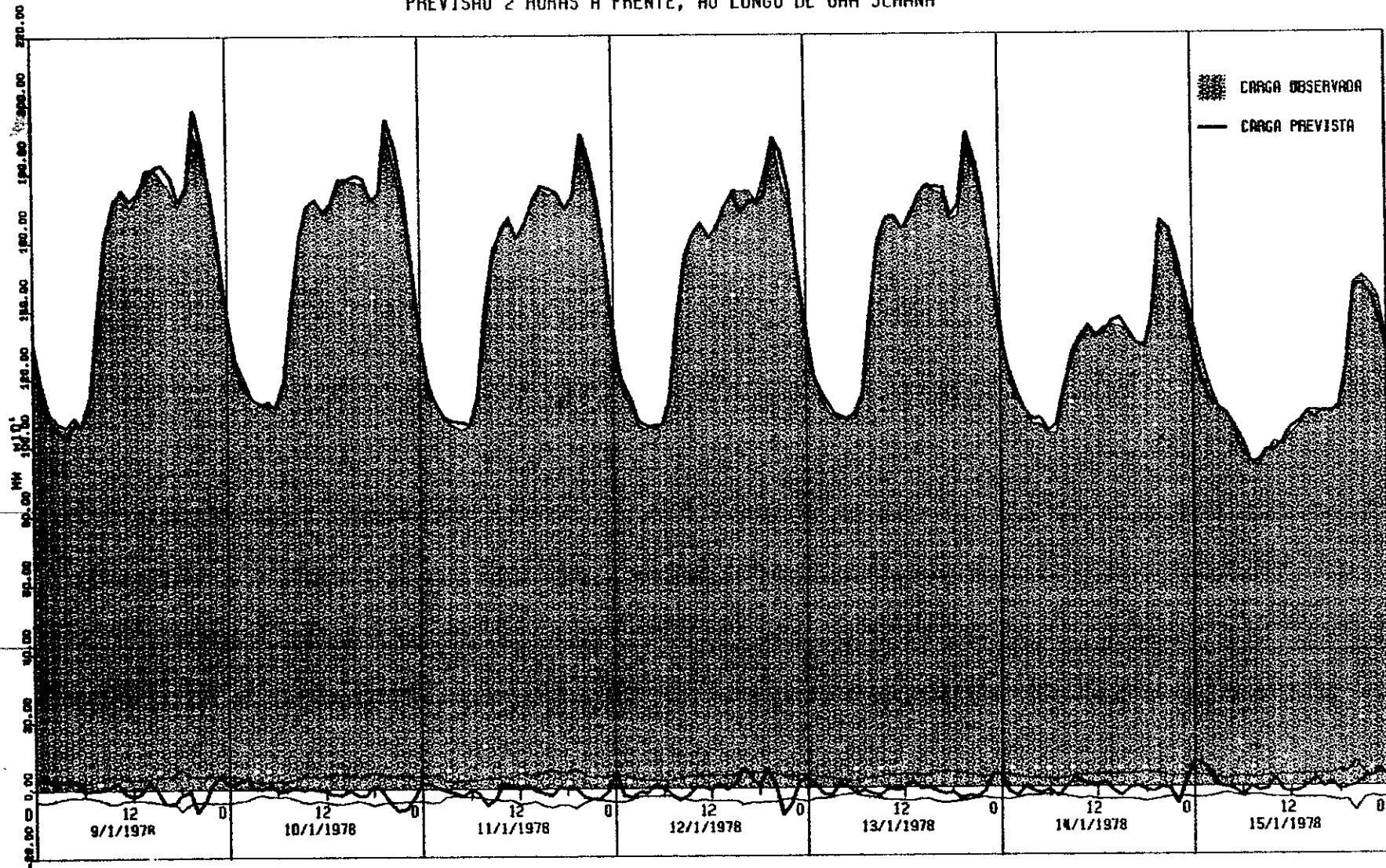
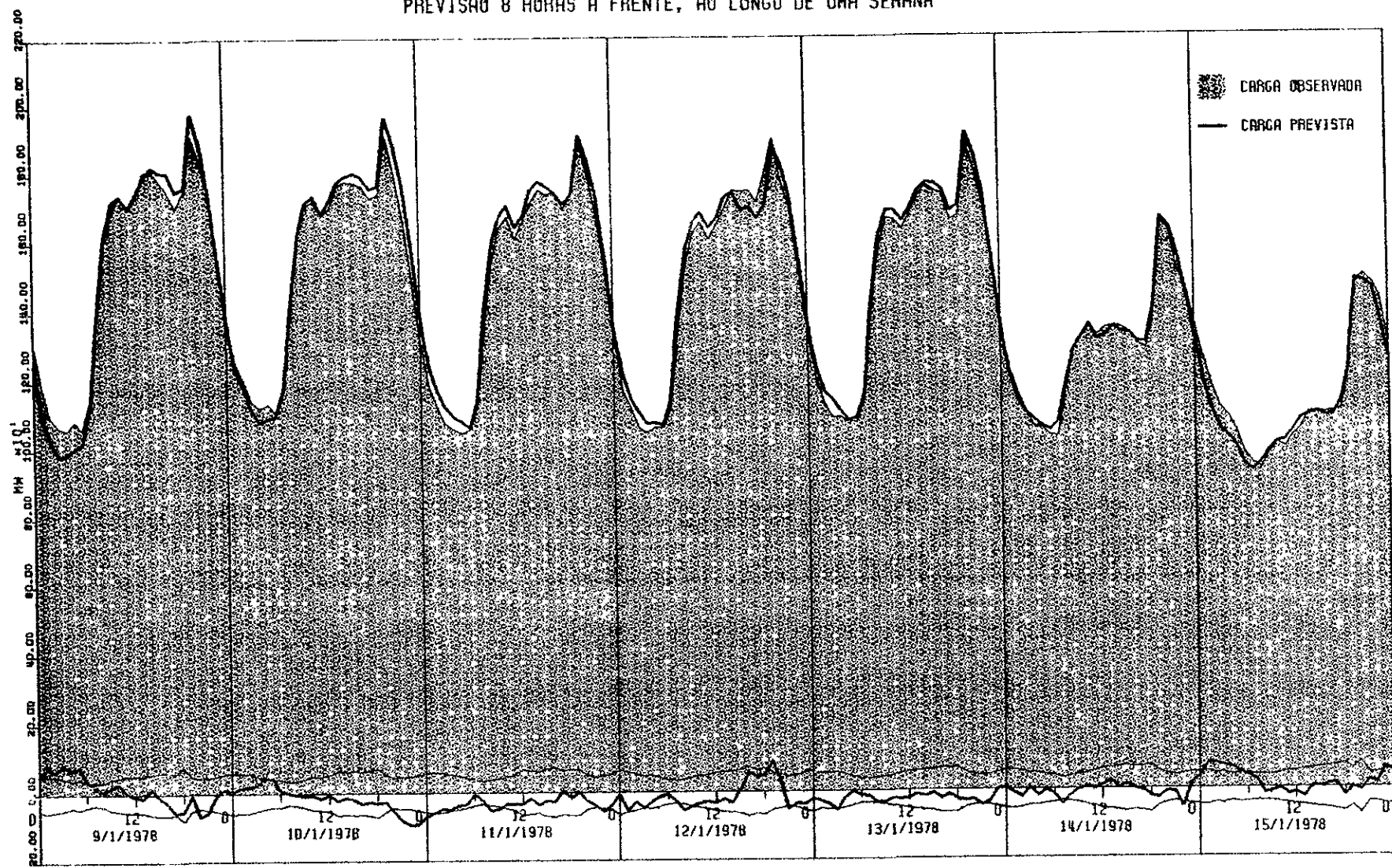


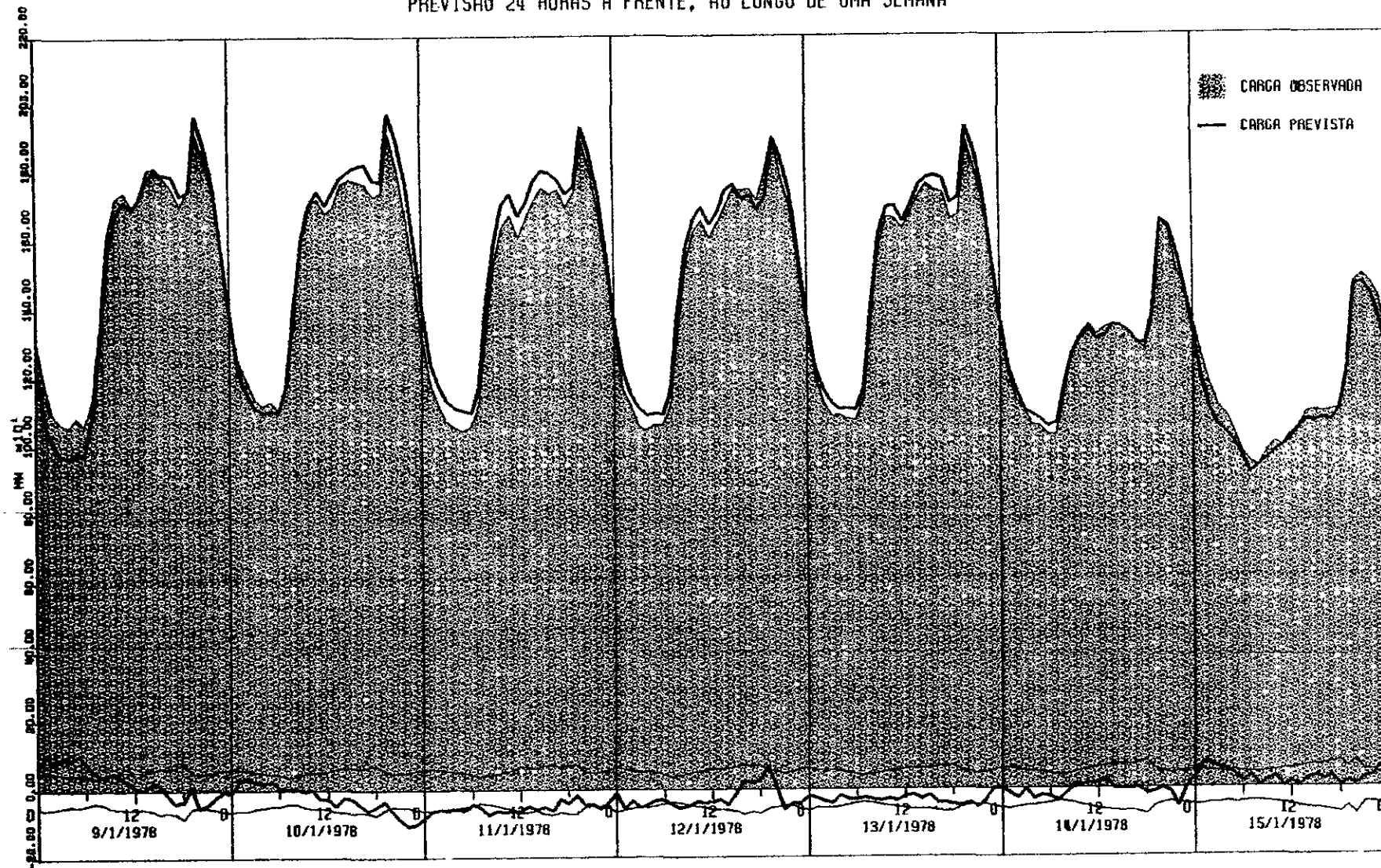
ILUSTRAÇÃO 3.2-2

PREVISAO 8 HORAS A FRENTE, AO LONGO DE UMA SEMANA



ILUSTRACAO 3.2-3

PREVISÃO 24 HORAS A FRENTE, AO LONGO DE UMA SEMANA



ILUSTRACAO 3.2-4

PREVISÃO 24 HORAS A FRENTE
A PARTIR DA HORA 24 DO DIA 10/1/1978

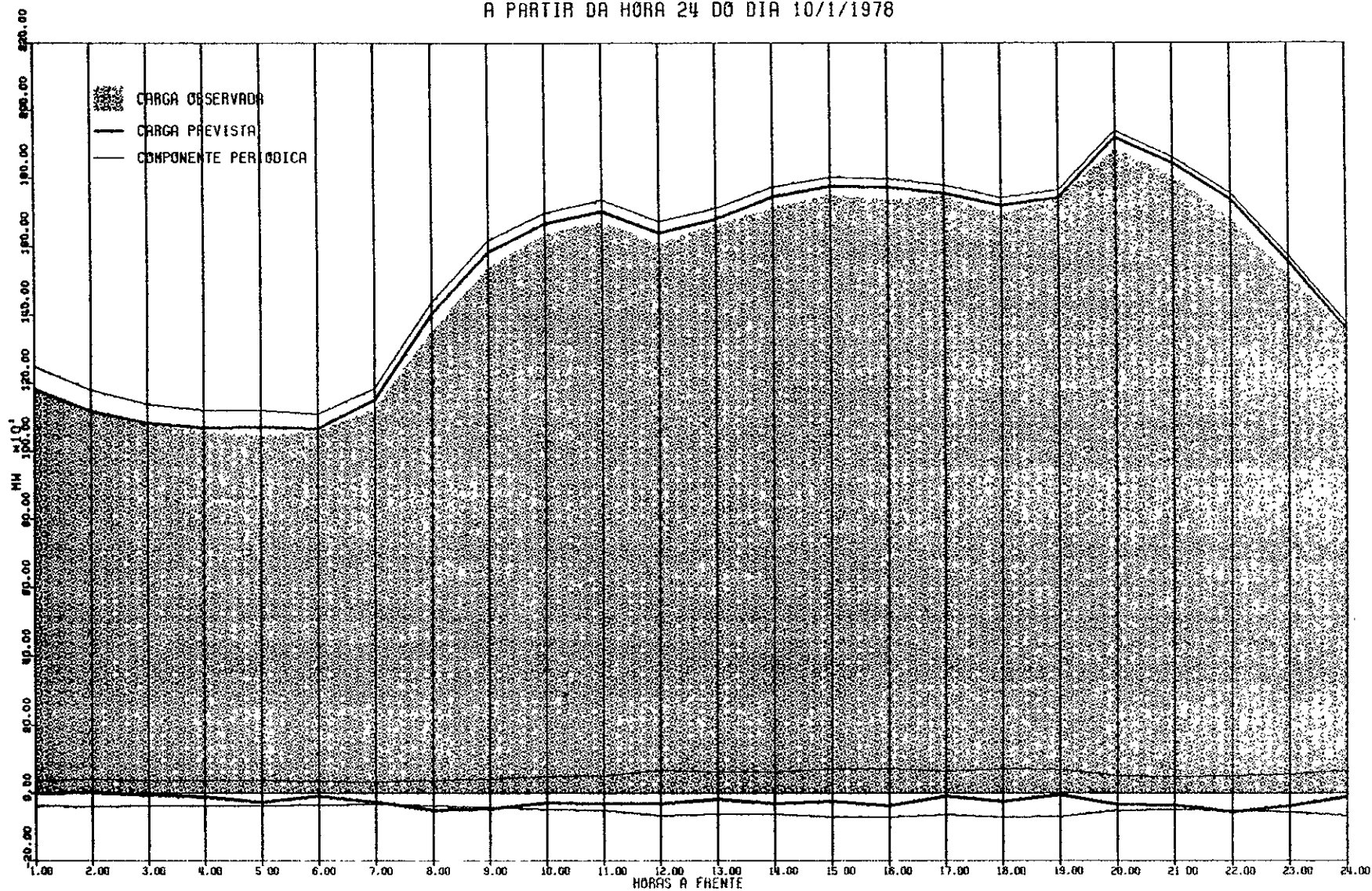


ILUSTRAÇÃO 3.2-5